

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2021

Том 4. Выпуск 2

Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77 - 72325 — сетевое издание от 14 февраля 2018 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес издателя и редакции: 630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 8/2, тел.: +7(383) 363-90-35, ИПА СО РАН, e-mail: redactor@soils-journal.ru, сайт: <https://www.soils-journal.ru>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, зав. лабораторией агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Заместители главного редактора

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, ВРИО директора, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Абакумов Евгений Васильевич – профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства (Улан-Удэ, Россия)

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амурьевна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам, ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ФГБОУ ВО Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Рожков Вячеслав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Почвенный институт им.В.В. Докучаева (Москва, Россия)

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, профессор, Институт геологии Национального автономного университета Мексики (Мехико, Мексика)

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора по науке, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией генезиса почв и радиоэкологии, ФГБУН Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, руководитель Сибирского НИИ земледелия и химизации СФНЦА РАН (Новосибирск, Россия)

Шпедт Александр Артурович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Содержание

Наумова Н.Б., Якименко В.Н., Нечаева Т.В.

От редколлегии

e156

Плодородие почв и минеральное питание растений

Гопп Н.В.

Влияние агрохимикатов на пространственно-временные изменения агрохимических свойств почвы и урожай брокколи

e157

Физика и гидрология почв

Шапорина Н.А., Сайб Е.А.

Пространственное распределение температуры почв в комплексном почвенном покрове Предсалаирья

e146

Почвы естественных экосистем

Баженов А.В., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Игловский С.А.

Радиоэкологические исследования почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область)

e137

Деградация и рекультивация почв

Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Almendros G., Klenov B.M.

Rainfall patterns associated with runoff and erosion levels in West-Siberian Chernozems

e145

Обзоры и рецензии

Устинов М.Т., Гаврилов Д.А., Елизаров Н.В.

Исторические аспекты развития мелиорации земель в Западной Сибири

e143

УДК 631.4

doi: [10.31251/pos.v4i2.156](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.156)

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Уважаемые читатели! Тематика статей анонсируемого номера журнала «Почвы и окружающая среда» достаточно разнообразна, представлены разноплановые материалы. Редакция надеется, что каждая из этих публикаций привлечет внимание наших заинтересованных читателей, которые в обозримом будущем сами могут стать авторами журнала.

В современном мире с обилием разных технологий и автоматических приборов, в том числе регистраторов температуры, становится возможным беспрецедентный пространственный и временной охват измеряемых в исследованиях переменных. Статья Н.А. Шапориной и Е.А. Сайб посвящена пространственному распределению температуры почв в комплексном почвенном покрове Предсалаирья (Западная Сибирь). Описание профильной и суточной динамики температуры почвы, регистрируемой каждые полчаса на протяжении полутора месяцев на разных глубинах нескольких почвенных профилей, представляет интерес для разных специалистов – от агрономов до экологов, поскольку позволяет получить детальное представление о факторах, влияющих на продукционный процесс растений и жизнедеятельность почвенной биоты.

В статье А.В. Баженова с соавторами рассматриваются результаты радиоэкологического исследования почв в районе разработки месторождения алмазов (Архангельская область). Авторы установили специфику зависимости подвижности и накопления радионуклидов в почвенном профиле от гранулометрического состава, содержания органического вещества, полуторных оксидов, минералогического состава, а также от температурного и водного режима; провели детальную инвентаризацию содержания различных химических элементов в профиле почв. Представленные авторами данные являются важной точкой сравнения для будущих радиоэкологических исследований, как в этом регионе, так и за его пределами.

А.А. Танасиенко с соавторами в своей работе на основе многолетнего экспериментального материала подробно описывают влияние такого метеорологического явления, как ливневые дожди, на водный сток и эрозию черноземов в Западной Сибири – основного типа почв пашни. Авторы имеют большой опыт изучения эрозии почв, что позволило им представить материалы в более широкой перспективе. Заслуживает внимания вывод авторов о том, что с точки зрения эрозии почв ливневые дожди наиболее опасны весной.

Статью Н.В. Гопп о влиянии агрохимикатов на пространственно-временные изменения агрохимических свойств почвы и урожай брокколи можно назвать, в каком-то смысле, новаторской, так как оценка пространственной неоднородности свойств почв в микрополевым опыте с разными удобрениями и мелиорантами проведена по агрохимическим картограммам. Автор установила, что качество геостатистического моделирования почвенных и растительных параметров вполне приемлемо, их визуальное отображение на картах соответствует фактическим данным, а диагностику содержания основных элементов питания в почве необходимо проводить каждые два года, чтобы принять правильные решения о вносимых дозах удобрений.

Внимания тех, кто интересуется развитием почвенной науки, особенно в ее прикладных аспектах, заслуживает статья М.В. Устинова с соавторами, касающаяся некоторых исторических аспектов развития мелиорации земель в Западной Сибири. В статье подробно описаны масштабные проекты и конкретные научные исследования, необходимые для перевода общей стратегии в тактику и практику повседневного сельскохозяйственного производства. Какие-то предложения были реализованы, какие-то – нет, но мелиоративные мероприятия остаются актуальными для некоторых территорий региона до сих пор.

Призываем наших читателей активно участвовать в комментировании статей на сайте журнала. Интересного и полезного чтения всем!

Редакция журнала
Наумова Н.Б., Якименко В.Н., Нечаева Т.В.



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ВЛИЯНИЕ АГРОХИМИКАТОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ И УРОЖАЙ БРОККОЛИ

© 2021 Н. В. Гопп

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: gopp@issa-siberia.ru

Цель исследования. Изучить влияние агрохимикатов (минеральных и органо-минеральных удобрений, регуляторов роста растений и мелиорантов) на пространственно-временные изменения свойств агросерой почвы и урожай брокколи с использованием картографического подхода.

Объекты и методы исследования. Полевой опыт проводили в 2016 году на участке, расположенном в окрестности села Быково на юго-востоке Западной Сибири (54°58'02.8"N; 83°5'21.45"E, Новосибирская область). Объекты исследования – агросерая ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая почва (Luvisc Retic Greyzemis Phaeozem (Siltic, Aric)) и капуста брокколи среднеспелого сорта «Линда». Схема опыта включала следующие варианты: (1) Контроль (без удобрений), (2) Фон (N100P60K160), (3) Фон + янтарная кислота, (4) Фон + доломит, (5) Фон + мульча, (6) Органо-минеральное удобрение «Криалл». Пробы почв проанализированы на содержание органического углерода, нитратного азота, общего, минерального и органического фосфора и его подвижной формы; обменного калия, кальция и магния, а также pH солевой вытяжки. В сухих образцах соцветий брокколи определяли общее содержание азота, фосфора, калия, кальция и магния.

Основные результаты. После применения агрохимикатов и сбора урожая брокколи коэффициенты вариации pH, содержания подвижных фосфора, калия и кальция увеличились в два и более раза. Использование агрохимикатов повысило урожай и улучшило питательную ценность соцветий брокколи. В вариантах с внесением минеральных удобрений наибольшая окупаемость удобрений получена в фоновом варианте. Внесение агрохимикатов проявилось в отрицательных (подкисление, связывание фосфора, кальция и магния) и положительных (повышение содержания элементов) эффектах. Имобилизация элементов питания (фосфора, кальция, магния) в труднорастворимых соединениях в почве и последующее снижение содержания подвижных форм не оказали отрицательного влияния на элементный состав соцветий брокколи. Таким образом, химическая иммобилизация приводит к закреплению элементов питания в верхнем горизонте почвы, что предотвращает их выщелачивание талыми и дождевыми водами в нижние горизонты.

Ключевые слова: геостатистика; кригинг; доломит; удобрения; pH; азот; фосфор; калий; кальций; магний

Цитирование: Гопп Н.В. Влияние агрохимикатов на пространственно-временные изменения агрохимических свойств почвы и урожай брокколи // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 2. e157. doi: 10.31251/pos.v4i2.157

ВВЕДЕНИЕ

Потеря плодородных почв, рост населения, урбанизация и изменение климата могут серьезно повредить производству продуктов питания, увеличить их стоимость и создать тяжелую ситуацию во всех странах (Lal et al., 1989; Pimentel, 2006; Govers et al., 2017). Большая часть сельскохозяйственных угодий в мире не удовлетворяет потребностям выращиваемых культур в минеральном питании из-за длительного использования почв и уязвимости перед текущими экзогенными и эндогенными процессами (эрозия, засоление, выщелачивание, уплотнение, заиливание, опустынивание и т.д.). Восполнение почвенных запасов элементов питания не осуществляется на должном уровне, что приводит к снижению урожайности и ухудшению качества продукции. В то же время внесение слишком большого количества минеральных удобрений приводит к неэффективному их использованию растениями, значительным потерям питательных веществ и загрязнению окружающей среды (Oldeman, 1988; Gastal, Lemaire, 2002; Geng et al., 2019). В этой связи, становятся все более актуальными научные исследования, которые, с одной стороны, позволяют увеличить производство продуктов питания, устранить дефицит и дисбаланс питательных элементов в почвах, а с другой стороны, минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду чрезмерных доз агрохимикатов, используемых для повышения урожайности.

В мировой практике методы цифрового картографирования эффективно используются для картографирования классов и свойств почв на основе экологических ковариат, рассчитываемых по данным дистанционного зондирования Земли (Sumfleth, Duttmann, 2008; Arrouays et al., 2014; Gopp et al., 2017; Chen et al., 2018; Soil organic..., 2018; Padarian et al., 2019; Suleymanov et al., 2021). Однако такой метод не подходит для крупномасштабного картографирования, когда расстояние между точками отбора проб почвы слишком мало и измеряется в сантиметрах, и при этом отсутствуют подробные данные дистанционного зондирования экологических ковариат с высоким пространственным разрешением. Поэтому альтернативными подходами для крупномасштабного агрохимического картографирования свойств почв являются методы геостатистической интерполяции, которые подробно описаны в литературе (Isaaks, Srivastava, 1989; Goovaert, 1997; Oliver, 2010; Красильников, 2009; Мешалкина и др., 2010; Демьянов, Савельева, 2010). Оценка пространственно-временных изменений плодородия почвы с помощью карт необходима для визуализации содержания питательных веществ в почве в каждой точке опробования. Сравнительный анализ карт помогает сделать выводы о влиянии агрохимикатов на изменение содержания питательных веществ в почве и происходящих в ней процессах, получить более подробную картину пространственно-временных закономерностей, а также оценить влияние питательных веществ почвы на продуктивность растений.

Опрос, проведенный в нескольких фермерских хозяйствах, показал, что большая часть землепользователей при внесении удобрений ориентируются на рекомендации, которые, как правило, не учитывают плодородие почв, а дозы удобрений рассчитываются на основе данных о выносе элементов питания планируемым урожаем. При таком подходе имеющиеся запасы элементов питания в почве не учитываются, следовательно, расчетные дозы вносимых удобрений на планируемый урожай будут высокими, что может привести к неблагоприятным последствиям для почвы и неоправданным финансовым затратам.

Одной из культур, перспективных для расширения ассортимента возделываемых овощей в Сибири (Фотев и др., 2018), является брокколи, достоинством которой является высокое содержание ценных питательных веществ: белка (3,2–4,5%), холина и метионина (4 мг/100 г), каротина (1,9–4,0 мг/100 г), сахара (1,5–3,8%), антиканцерогенного вещества (сульфорафана) (Иновационные технологии..., 2012; Потапова и др., 2016). Защитные эффекты от риска развития рака у человека при употреблении в пищу брокколи связаны с высоким содержанием серосодержащих гликозидов и продуктов их распада – изотиоцианатов (Verhoeven et al., 1996; Razis, Noor, 2013).

Исходя из установленных фактов, нами был поставлен эксперимент, в котором запасы элементов питания в почве не учитывали, а дозы минеральных удобрений были взяты из рекомендаций по выращиванию брокколи. Данный эксперимент позволил показать, что учет потенциального плодородия почв позволяет оптимизировать финансовые затраты, а также обосновать необходимость предварительной оценки запасов элементов питания в почве при расчете оптимальной дозы удобрений при выращивании брокколи.

Цель исследования – изучить влияние агрохимикатов (минеральных и органо-минеральных удобрений, регуляторов роста растений и мелиоранта) на пространственно-временные изменения свойств агросерой почвы и продуктивности брокколи с использованием картографического подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт проводили в 2016 году на участке, расположенном в районе села Быково (54° 58'02.8"N; 83°5'21.45"E) на юго-востоке Западной Сибири (Новосибирская область). В геоморфологическом отношении участок находится в северо-западной части Предсалаирской возвышенной равнины (Вдовин, Малолетко, 1969). Абсолютная высота 130 м над уровнем моря. Согласно природному районированию, территория участка находится в пределах лесостепной зоны, климат континентальный. Средние температуры: годовая – -0,3 – -0,6 °С, января – -19 °С, июля – +19 °С. Сумма средних суточных температур воздуха выше +10 °С колеблется от 1600 до 1800 °С·день. Количество осадков варьирует от 400 до 450 мм/год. Территория исследования относится к недостаточно увлажненной зоне, гидротермический коэффициент в пределах 1,0–1,2 (Атлас, 2002).

Объекты исследования – агросерая ненасыщенная среднегумусированная тяжелосуглинистая почва (Luvic Retic Greyzemic Phaeozem (Siltic, Aric)) и среднеспелый сорт

капусты брокколи «Линда». Агросерая почва опытного участка, диагностированная по полевому определителю почв России (2008), относится к среднегумусированному виду и характеризуется кислой реакцией среды, средним уровнем содержания нитратного азота, обменного калия и магния; повышенным – обменного кальция; очень высоким – подвижного фосфора. Содержание в почве основных элементов питания и гумуса снижалось с глубиной, за исключением подвижного фосфора, для содержания которого была характерна обратная тенденция (табл. 1).

Таблица 1

Агрохимическая характеристика агросерой почвы

Обозначение горизонта, глубина, см	pH _{кол}	Гумус, %	Содержание подвижных форм элементов, мг/кг			Содержание обменных катионов, смоль(экв)/кг	
			N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
P , 0-30	5,0	4,0	15,5	230	102	12,4	1,8
AEL , 30-41	4,8	2,4	10,8	250	80	9,9	1,9
BEL , 41-80	4,8	0,7	4,3	320	85	11,7	1,7
BT , 80-110	4,8	0,4	1,8	300	56	12,0	0,8
C , 110-150	4,5	0,2	1,2	450	60	11,5	0,5

Образцы агросерой почвы отбирали из слоя 0–30 см (средняя проба из трех образцов, отобранных почвенным буром) под каждым растением (24 шт.) дважды за вегетационный период: после высадки рассады (05.06.2016 г.) и после уборки урожая (25.09.2016 г.). Пробы почв проанализированы: на содержание углерода мокрым озолением по Тюрину, pH солевой вытяжки – потенциометрическим методом, содержание нитратного азота – по Карпинскому-Замятиной (экстрагент 0,03 М K₂SO₄), подвижного фосфора – по Чирикову (экстрагент 0,5 М CH₃COOH), обменного калия по Масловой (экстрагент 1 М CH₃COONH₄), необменный калий по Прэт и Морсе (экстрагент 1 М HNO₃) (Агрохимические..., 1975; Практикум..., 2001; Минеев и др., 2001). Общий (P_{общ}), минеральный (P_{мин}) и органический фосфор (P_{орг}) определены по методу Сэндерса и Вильямса (Soil sampling..., 2008). По разнице значений между содержанием минерального и подвижного фосфора по Чирикову определяли фосфор труднорастворимых фосфатов. Обменные катионы (кальций, магний) извлекали 1 М CH₃COONH₄ с последующим определением на атомно-абсорбционном спектрометре.

Схема опыта включала следующие варианты: (1) Контроль (без удобрений); (2) Фон (N100P60K160); (3) Фон + янтарная кислота; (4) Фон + доломит; (5) Фон + мульча; (6) Органо-минеральное удобрение «Криалл». Дозы минеральных удобрений указаны в действующем веществе (д.в./га). В качестве источников азота, фосфора, калия и магния использовали следующие удобрения: нитрат аммония, обогащенный гуматом калия (34% N); двойной суперфосфат, обогащенный гуматом калия (38% P₂O₅); хлорид калия (60% K₂O), обогащенный магнием; органо-минеральное удобрение «Криалл».

Рассаду брокколи высаживали по схеме 50x50 см в двойные ряды с расстоянием между рядами 70 см (рис. 1, 2). Площадь экспериментального участка составляла 8 м² (2x4 м). Для брокколи характерно не одновременное созревание соцветий, поэтому степень зрелости определялась по появлению первого распускающегося цветка на соцветии. В сухих образцах соцветий брокколи определено общее содержание азота на CHN-анализаторе, фосфора – колориметрическим методом, а также калия, кальция, магния на атомно-абсорбционном спектрометре с предварительным сухим озолением образцов (Практикум..., 2001; Kalga, 1998).

Биологические особенности брокколи: достигает высоту 70–100 см; основная масса корней залегает на глубине 20–25 см; малотребовательна к теплу и плодородию почвы, влаголюбива; выдерживает заморозки до -7-10 °С. Оптимальные параметры окружающей среды: температура воздуха от +16 до +25 °С, относительная влажность воздуха – 85%, влажность почвы – 70% наименьшей влагоемкости, реакция среды почв – близкая к нейтральной (Инновационные технологии..., 2012).

Агрохимикаты вносили 4 раза за сезон в виде жидких корневых подкормок. Дозы NPK-удобрений в действующем веществе были переведены в физический вес и разделены на 4 части, которые растворяли в воде (8 л) перед непосредственным внесением в почву. Приготовленный раствор (0,5 л, pH = 7,2) вносили под каждое растение брокколи. Первое внесение агрохимикатов производили через неделю после высадки рассады. Последнее применение агрохимикатов

проводили за две недели до уборки соцветий брокколи. Брокколи поливали все лето водой ($pH=7,4$) из реки Мосиха практически через каждые два дня, так как в 2016 году наблюдался дефицит атмосферных осадков. Оросительная норма за весь сезон составила $2000 \text{ м}^3/\text{га}$.



Рисунок 1. Внешний вид брокколи после высадки рассады в грунт (5.06.2016 г.)

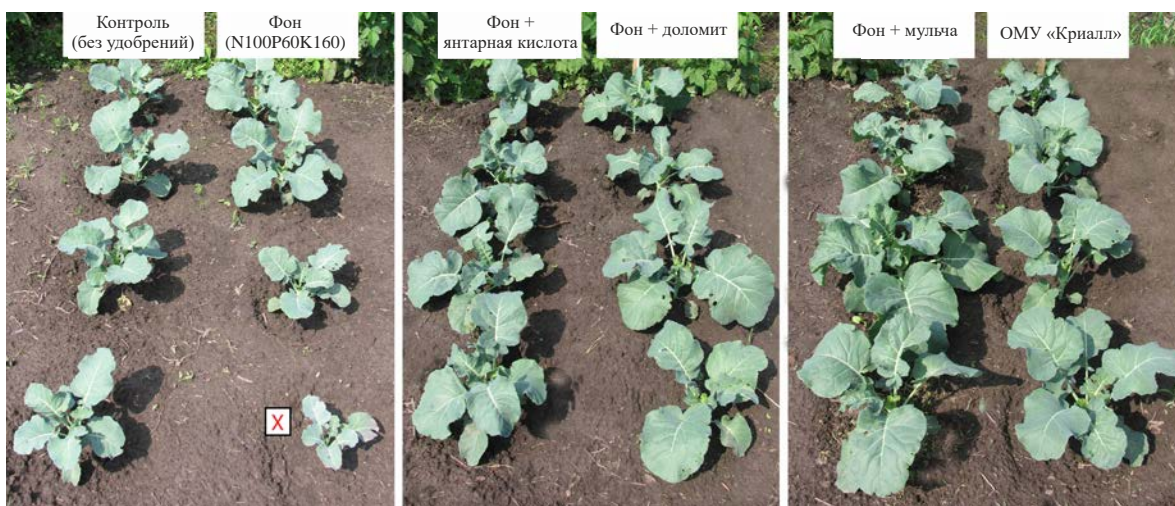


Рисунок 2. Внешний вид брокколи в фазу 5-6 листьев (06.07.2016 г.). Примечание: красным крестиком обозначено растение, отстающее в росте.

Янтарную кислоту вносили в почву 4 раза за сезон в виде 0,02% раствора ($pH 7,4$) по 0,5 л под каждое растение. Янтарная кислота (бутандиовая кислота, этан-1,2-дикарбоновая кислота) представляет собой двухосновную карбоновую кислоту, которая в небольших количествах содержится во многих растениях. Янтарная кислота стимулирует рост и увеличивает урожайность растений, улучшает обмен веществ и является активным компонентом органического синтеза.

Доломитовую муку, содержащую кальций (60% CaO) и магний (25% MgO), вносили в почву в виде суспензии (200 г на 10 л воды, $pH = 9,2$) по 0,5 л под каждое растение. Общая доза доломитовой муки, внесенной за весь сезон, составила $200 \text{ г}/\text{м}^2$. Количество воды, внесенное в вариантах с доломитом и янтарной кислотой, компенсировали в оставшихся вариантах опыта поливом чистой водой.

Сырую мульчу из свежескошенного и измельченного белого клевера вносили 4 раза за сезон (100 г под каждое растение), которую смешивали с верхним слоем почвы. Общий вес внесенной мульчи за весь сезон составил 400 г. Содержание биофильных элементов (в % на абсолютно сухое вещество) в мульче клевера было следующим: азот (N) – 3,5–4,0; фосфор (P) – 0,26–0,33; калий (K) – 2,0–2,9; кальций (Ca) – 2,2–2,6; магний (Mg) – 0,21–0,80; сера (S) – 0,20–0,30.

ОМУ «Криалл» вносили 4 раза за сезон в виде раствора (60 г на 10 л воды), объем вносимого раствора под каждый куст составлял 1 л (рН=7,4). В ОМУ «Криалл» содержатся (в % на сухое вещество): азот (N) – 11,5; фосфор (P₂O₅) – 12; калий (K₂O) – 14; кальций (CaO) – 1,57; магний (MgO) – 0,36; железо (Fe) – 0,2; марганец (Mn) – 0,005; цинк (Zn) – 0,002; медь (Cu) – 0,0003; бор (B) – 0,2; молибден (Mo) – 0,0001. Общая доза элементов питания, внесенная за весь сезон, составила: N30; P30; K40; Ca4; Mg0,9; Fe0,5; Mn0,011; Zn0,005; Cu0,0008; B0,5; Mo0,0003 (кг/га). При производстве ОМУ «Криалл» в качестве исходного сырья используют опилки, древесную золу, сапрпель, или только перегной. Кроме вышеназванных элементов в удобрении содержатся полезные почвенные микроорганизмы, антисептики и дубильные вещества. Разработчиками ОМУ «Криалл» являются новосибирские ученые Кривоупцкая Л.М. и Кривоупцкий В.С.

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа ANOVA. Сравнение вариантов (post hoc test) проводили по методу Бонферони, а также с помощью расчета наименьшей существенной разницы (НСР). Степень интенсивности вариации (CV, %) оценивали по шкале, которая предложена И.И. Елисеевой и М.М. Юзбашевым (2002): слабая (CV<10 %); умеренная (CV от 10 до 25%); сильная (CV>25 %).

Для определения направления анизотропии (с азимутами 0°, 45° и 90°) изучаемых параметров для разных сроков отбора образцов составляли экспериментальные и теоретические вариограммы в программном обеспечении VARIOWIN 2.21 (Pannatier, 1996). С использованием таких параметров как нагет эффект, радиус, порог, анизотропия, полученных в результате подгонки теоретической модели к экспериментальной, проводили интерполяцию значений между точками отбора образцов методом ординарного кригинга в программном обеспечении Surfer 8. Оценку степени общей пространственной неоднородности проводили по параметрам вариограммы для моделей (экспоненциальная, Гаусса, сферическая) по соотношению нагет/порог (C₀/(C₀+C)) по следующей шкале: <0,25 – сильная; 0,25–0,75 – средняя; >0,75 – слабая пространственная корреляция изучаемых параметров (Cambardella et. all, 1994). Для степенной модели такая шкала, по всей видимости, не разработана.

Кросс-валидацию и расчет среднеквадратической ошибки RMSE (Root Mean Square Error) проводили в SAGA GIS методом «leave-one-out» по следующей формуле (Hengl, 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \sum_{j=1}^l [\hat{z}(s_j) - z^*(s_j)]^2}$$

где $\hat{z}(s_j)$ – предсказанное значение; $z^*(s_j)$ – фактическое значение; l – количество точек проверки.

В том числе оценку точности геостатистического моделирования проводили с помощью расчета средней абсолютной относительной ошибки MAPE (Mean Absolute Percentage Error) по следующей формуле (Афанасьев, Цыпин, 2008):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_t - \bar{y}_t|}{y_t} \times 100$$

где y_t – фактическое значение; \bar{y}_t – прогнозное значение; n – объем проверочной выборки.

MAPE ошибка показывает, на сколько (в процентах) в среднем прогноз отклоняется от фактического значения. Интерпретация оценки точности прогноза на основе показателя MAPE представлена в следующей градации (Афанасьев, Цыпин, 2008): <10% – высокая; 10–20% – хорошая; 20–50% – удовлетворительная; >50% – неудовлетворительная точность прогнозирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статистический и геостатистический анализ данных. Оценка полученных данных по критерию Шапиро-Уилка до и после внесения агрохимикатов показала, что вероятностное распределение таких свойств как рН, содержание подвижного фосфора и обменного кальция не подчинялось закону нормального распределения Гаусса. Нормальное распределение в начале опыта изменилось на аномальное к концу опыта для содержания органического и труднорастворимого фосфора (табл. 2).

Таблица 2

Описательная статистика

Почвенные и растительные параметры	До внесения агрохимикатов (начало опыта), $n=24$			После внесения агрохимикатов (конец опыта), $n=24$		
	$M \pm s$ <i>Med; Q₁; Q₃</i> *	Тест Шапиро-Уилка **		$M \pm s$ <i>Med; Q₁; Q₃</i> *	Тест Шапиро-Уилка**	
		W	p		W	p
рН солевой вытяжки	5,03±0,29 4,97; 4,88; 5,04	0,63	0,00	5,18±0,65 5,04; 4,71; 5,24	0,78	0,00
Углерод органический, %	2,36±0,11	0,97	0,73	2,45±0,12	0,93	0,11
Азот нитратный, мг/кг	20,95±5,39	0,96	0,51	2,73±0,64	0,98	0,94
Фосфор общий, мг/кг	2002±48	0,95	0,35	2061±47	0,95	0,24
Фосфор трудно-растворимый, мг/кг	675±51	0,95	0,34	731±105 708; 670; 764	0,84	0,00
Фосфор органический, мг/кг	1086±60	0,96	0,65	1089±73 1107; 1060; 1126	0,88	0,00
Фосфор подвижный, мг/кг	244±19 247; 238; 257	0,73	0,00	241±35 251; 231; 267	0,88	0,01
Калий обменный, мг/кг	104±6,8	0,96	0,50	144±36	0,92	0,07
Калий необменный, мг/кг	1002±49 993; 973; 1019	0,90	0,03	1002±58	0,97	0,69
Кальций обменный, смоль(экв)/кг	13,4±1,5 13,0; 12,7; 13,3	0,54	0,00	15,2±5,5 13,4; 11,9; 14,2	0,65	0,00
Магний обменный, смоль(экв)/кг	1,69±0,01	0,97	0,78	1,69±0,03	0,96	0,56
Масса соцветий брокколи, г	–	–	–	592±195	0,97	0,74

Примечание: $M \pm s$ – среднее арифметическое значение и стандартное отклонение, W – критерий Шапиро-Уилка, p – уровень значимости, * – значения медианы (Med), первого (Q_1 , 25%) и третьего (Q_3 , 75%) квартиля приведены только для данных с аномальным распределением (выделено серым цветом с $p < 0,05$), ** – без единиц измерения.

Согласно литературным данным (Hengl, 2007; Oliver, 2010), одним из условий применения методов геостатистики является нормальное вероятностное распределение данных. Данные о свойствах почв с аномальным распределением привели к нормальному с помощью логарифмирования для дальнейшего построения вариограмм и получения параметров модели. Экспериментальные данные для большинства свойств почв имели одинаковое поведение для различных направлений, т.е. характеризовались изотропным поведением пространственной связи (рис. 3, 4). Подходящий тип модели, порог и нагет (эффект самородка) были определены по всенаправленным вариограммам. Подгонку теоретической модели к экспериментальной осуществляли с помощью опции «Best fit found», т.е. нахождение наиболее подходящих параметров. На рисунках 3 и 4 показано, что тип модели для многих свойств почв изменился к концу опыта. Кросс-валидация и сравнение значений RMSE «leave-one-out» моделей со стандартным отклонением изучаемых параметров показали, что у большинства моделей RMSE больше половины стандартного отклонения или равно ему (табл. 2, 3). Согласно исследованиям (Singh et al., 2004), близкие к нулю значения RMSE указывают на идеальное соответствие модели фактическим данным. Значение RMSE меньше половины стандартного отклонения указывает на высокую точность прогнозирования. В процитированном выше исследовании не говорится о том, какого качества будет модель если RMSE равно стандартному отклонению или больше его. Таким образом, сделать вывод относительно точности моделей на основе полученных в этом исследовании значений RMSE непросто, или этот показатель неверно интерпретируется, так как визуальный осмотр составленных карт (приведены ниже) показывает хорошее соответствие интерполированных значений фактическим данным.

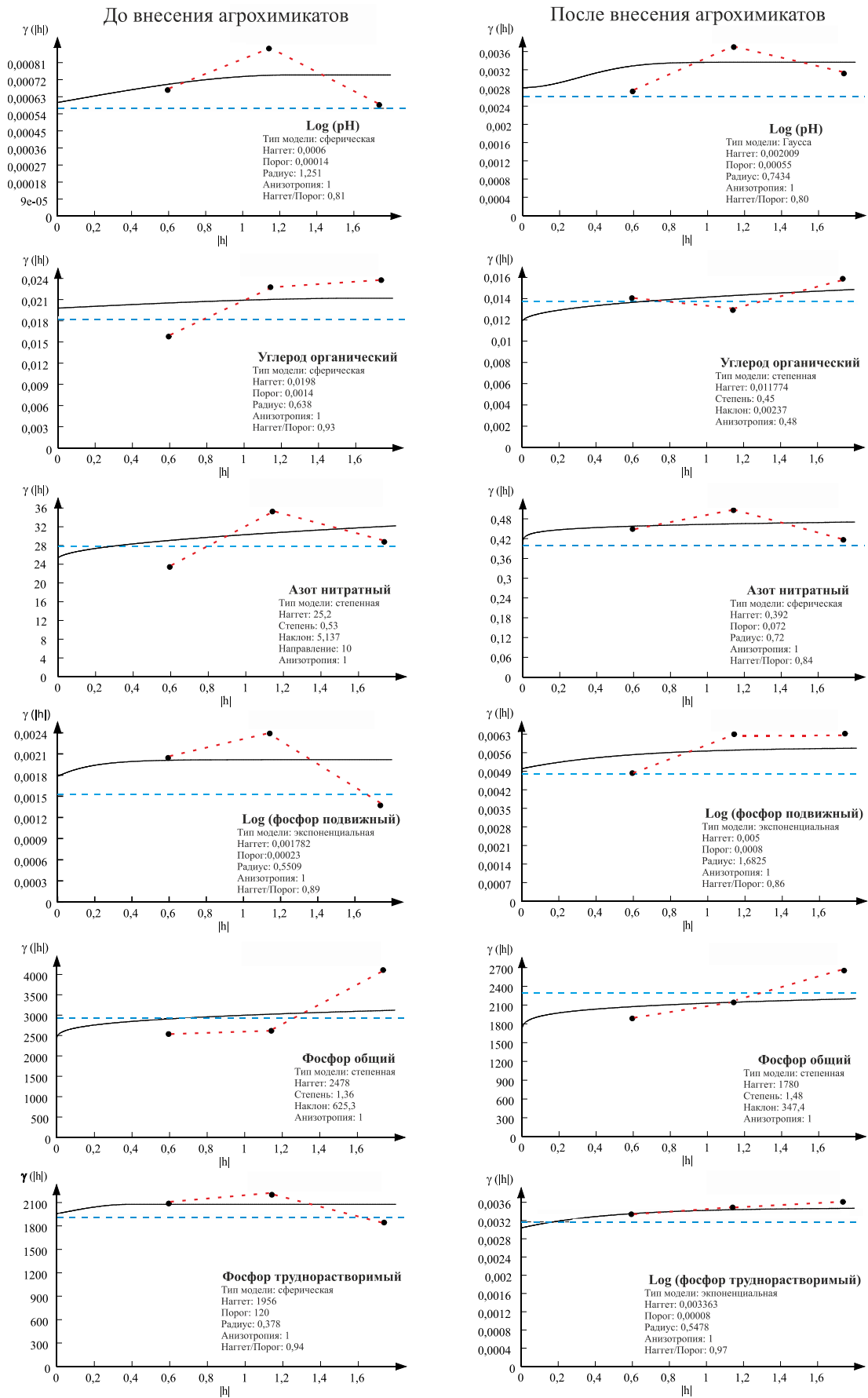


Рисунок 3. Вариограммы для почвенных свойств. Примечание: $\gamma (|h|)$ – полудисперсия, $|h|$ – расстояние, м; экспериментальные данные (красная пунктирная линия с парами точек) и теоретическая модель (черная линия), голубой пунктирной линией обозначена дисперсия.

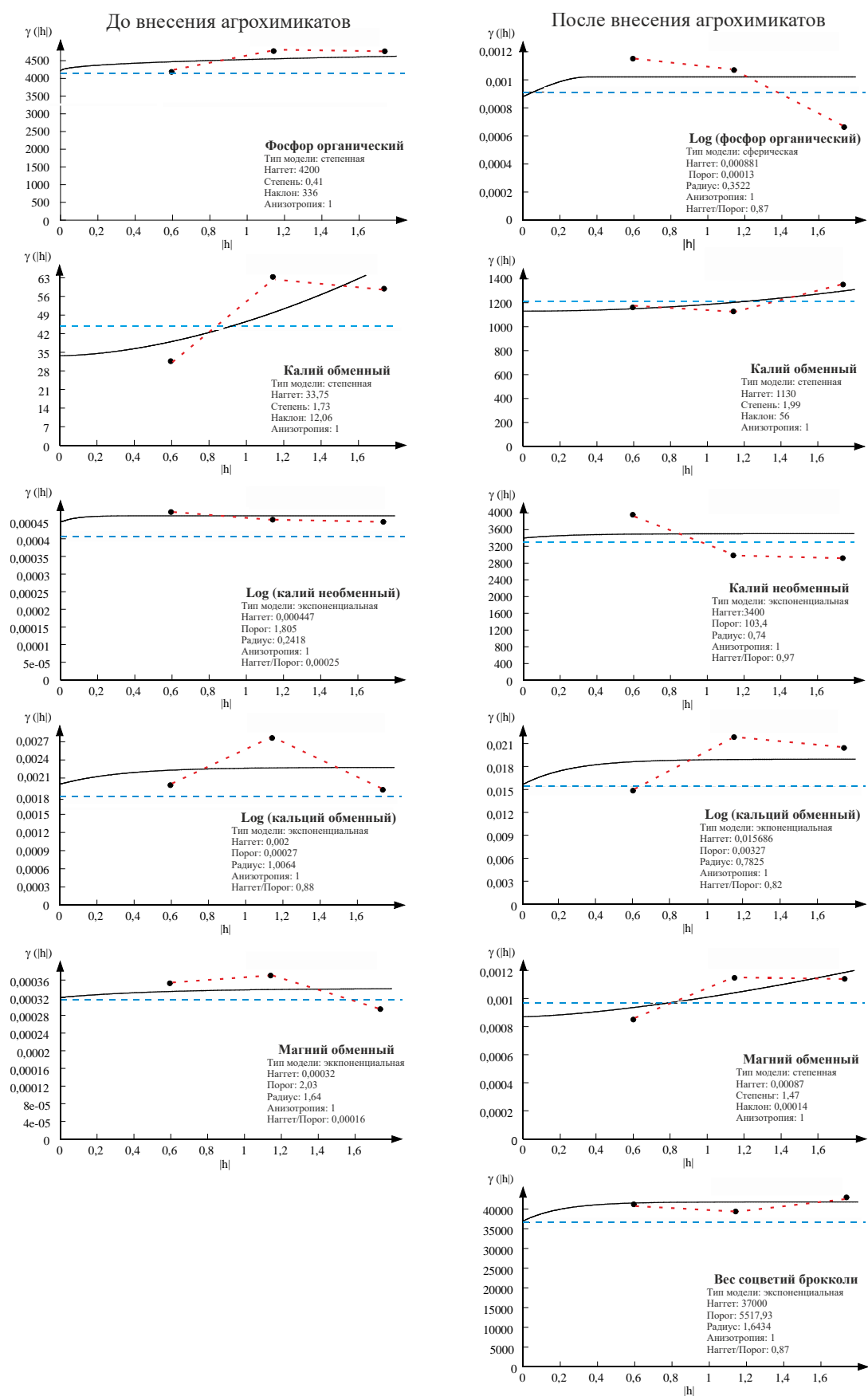


Рисунок 4. Вариограммы для почвенных свойств и веса соцветий брокколи. Примечание: $\gamma(|h|)$ – полудисперсия, $|h|$ – расстояние, м; экспериментальные данные (красная пунктирная линия с парами точек) и теоретическая модель (черная линия), голубой пунктирной линией обозначена дисперсия.

В исследованиях (Hengl, 2007) показано, что только с помощью независимого (контрольного) набора данных можно рассчитать истинную точность прогнозирования (интерполирования). Несмотря на небольшой объем выборки, была предпринята попытка оценить точность пространственного моделирования методом «jack-knife» (т.е. в случайном порядке несколько наблюдений были изъяты из выборки). Из каждого варианта опыта было изъято по одному наблюдению (до и после применения агрохимикатов). Расчеты показали для большинства изучаемых параметров значения RMSE «jack-knife» меньше половины стандартных отклонений и они ниже по сравнению с RMSE «leave-one-out», что свидетельствует о высокой точности интерполирования (табл. 2, 3). Некоторые исследователи (Ali, Abustan, 2014) считают, что RMSE нелогичный, неоднозначный или неверно интерпретируемый параметр для того, чтобы делать выводы относительно качества моделей. Поэтому дополнительно был произведен расчет такого показателя как средняя абсолютная относительная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error), результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3

Оценка точности геостатистического моделирования

Почвенные и растительные параметры	До внесения агрохимикатов (начало опыта)			После внесения агрохимикатов (конец опыта)		
	RMSE «leaf-on-out»	RMSE «jack-knife»	MAPE «jack-knife», %	RMSE «leaf-on-out»	RMSE «jack-knife»	MAPE «jack-knife», %
рН солевой	0,29	0,15	2,3	0,65	0,32	5,0
Углерод органический	0,1	0,12	4,1	0,19	0,13	4,2
Азот нитратный	4,78	5,4	19,2	0,69	0,49	16,6
Фосфор общий	58,3	46,8	1,9	37,8	41,1	1,5
Фосфор труднорастворимый	51,5	52,1	5,1	155,8	137,3	8,3
Фосфор органический	83,1	52,3	3,7	92,6	97,5	6,2
Фосфор подвижный	20,7	18,8	5,2	38,3	12,9	4,3
Калий обменный	4,8	4,0	2,9	36,2	11,4	7,3
Калий необменный	51,8	28,8	2,1	59,8	71,8	5,6
Кальций обменный	1,54	0,7	3,2	5,27	2,2	11,2
Магний обменный	0,018	0,02	1,2	0,03	0,03	1,2
Масса соцветий брокколи	–	–	–	203,3	225,0	36,6

Примечание. RMSE представлен в единицах измерения, которые приведены в табл. 2.

По значениям MAPE «jack-knife» можно сделать вывод о высокой точности прогнозирования для параметров, у которых MAPE < 10% и хорошей – MAPE от 10 до 20% (табл. 3). Для массы соцветий брокколи модель была удовлетворительного качества – MAPE от 20 до 50%. Таким образом, качество геостатистического моделирования почвенных и растительных параметров вполне приемлемое для этого исследования и визуальное отображение на картах (приведены ниже) соответствует фактическим данным.

Оценка степени общей пространственной неоднородности по соотношению нагет/порог ($C_0/(C_0+C)$) показала, что его значения для большинства почвенных свойств больше порога 0,75, следовательно, наблюдается слабая пространственная корреляция или слабая зависимость полудисперсии от расстояния между точками; по всей видимости, это связано с наличием стохастического поведения вариации в общей неоднородности изучаемых параметров (рис. 3, 4).

Пространственно-временная изменчивость рН-KCl почвы. Реакция среды солевой вытяжки почв перед применением агрохимикатов была кислой и слабокислой во всех вариантах опыта (рис. 5, А). Статистические сравнения показали отсутствие различий рН почвы между вариантами (рис. 5, А). По значениям рН после применения агрохимикатов почва практически всех вариантов отличалась друг от друга (рис. 5, Б). В вариантах 1, 4 и 6 произошло подщелачивание, а в вариантах 2, 3 и 5 – подкисление солевой вытяжки почв. Подщелачивание почв в первом контрольном варианте, по всей видимости, связано с поливом в период вегетации водой с нейтральным рН (рН = 7,4). В варианте 4 произошло значительное подщелачивание рН почвы после внесения доломитовой муки. Среднее значение рН почвы до внесения доломитовой муки было 4,9, после ее внесения составило 6,5. Внесение органо-минерального удобрения «Криалл», содержащего в своем составе золу, привело к подщелачиванию рН почвы.

Согласно шкале (Елисеева, Юзбашев, 2002), степень интенсивности вариации рН до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) и умеренная (CV от 10 до 25%) соответственно (рис. 5 А, Б). Коэффициент вариации рН почвы в конце опыта увеличился в два раза после внесения агрохимикатов по сравнению с тем, что было до внесения удобрений.

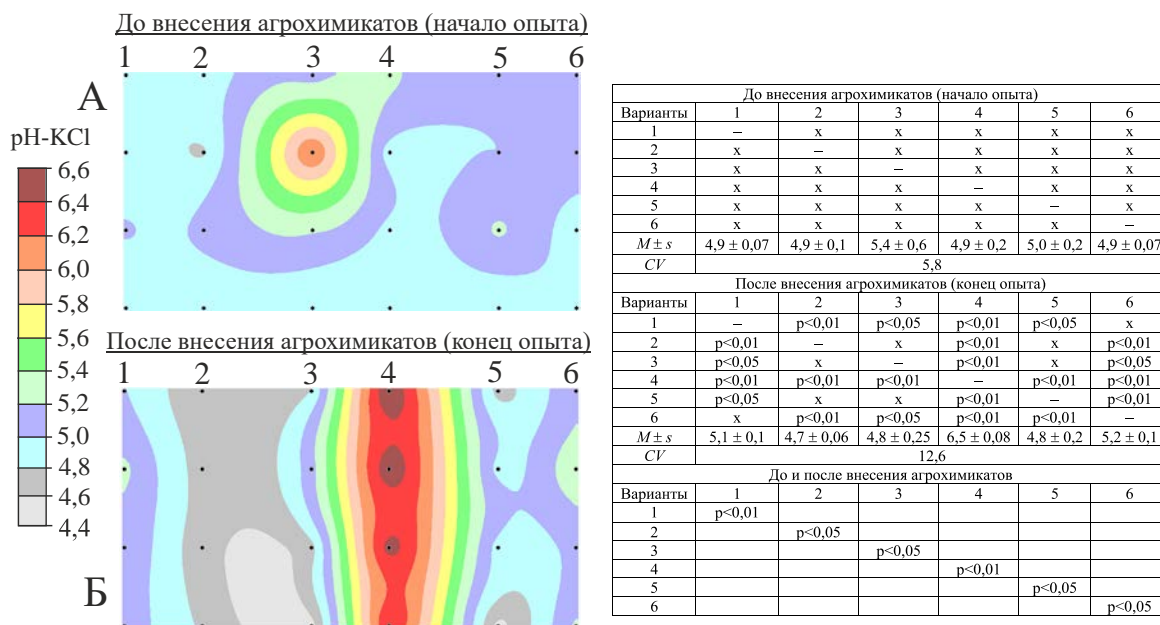


Рисунок 5. Картограммы реакции среды солевой вытяжки почв до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40). Условные обозначения к рис. 5-15: x – отличия не значимы; $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$ – различия значимы при указанной вероятности ошибки (p); $M \pm s$ – среднее арифметическое значение и стандартное отклонение; CV (%) – коэффициент вариации; точки на картограммах – расположение брокколи.

Пространственно-временная изменчивость содержания органического углерода в почве. Перед применением агрохимикатов содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве разных вариантов опыта варьировало в диапазоне от 2,2 до 2,7% (рис. 6, А).

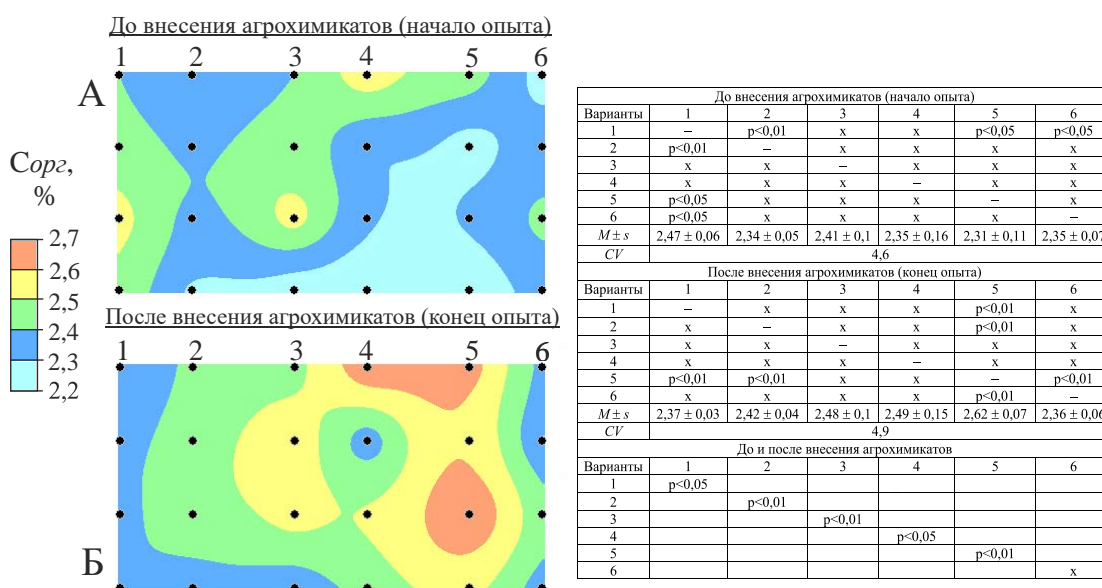


Рисунок 6. Картограммы содержания органического углерода в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание $C_{орг}$ в почве варианта 1 было выше по сравнению со 2, 5 и 6 вариантами. В почве остальных вариантов опыта отличий по содержанию $C_{орг}$ не обнаружено.

Статистические сравнения показали, что после применения агрохимикатов содержание $C_{орг}$ в варианте 5 было выше, чем в вариантах 1, 2 и 6 (рис. 6, Б). В почве других вариантов опыта различий в содержании $C_{орг}$ не обнаружено (рис. 6, Б).

Установлены различия в содержании $C_{орг}$ в почве вариантов 1, 2, 3, 4 и 5 по отношению к соответствующим вариантам до внесения агрохимикатов: в варианте 1 его содержание уменьшилось на 4%, во 2, 3, 4 и 5 – увеличилось на 3–13%, с максимальным значением в варианте 5 (рис. 6, Б). Внесенные в почву аммиачная селитра и двойной суперфосфат были обогащены гуматом калия, по всей видимости, увеличение $C_{орг}$ в вариантах 2, 3, 4 и 5 связано с внесением в почву этого углеродсодержащего соединения, а в пятом варианте с дополнительным внесением сырой мульчи.

Степень интенсивности вариации содержания $C_{орг}$ до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) в обоих случаях (рис. 6, А, Б).

Пространственно-временная изменчивость содержания нитратного азота в почве. Перед применением агрохимикатов содержание нитратного азота в почве различных вариантов опыта варьировало в широком диапазоне от 10 до 30 мг/кг (рис. 7, А). Почва по обеспеченности нитратным азотом относилась к категории со средним (от 10 до 15 мг/кг) и высоким (> 15 мг/кг) его содержанием. Почва варианта 2 отличалась от 3 и 4 более высоким содержанием нитратного азота в 1,4 и 1,7 раза соответственно. В почве остальных вариантов опыта отличий по содержанию нитратного азота не установлено (рис. 7, А).

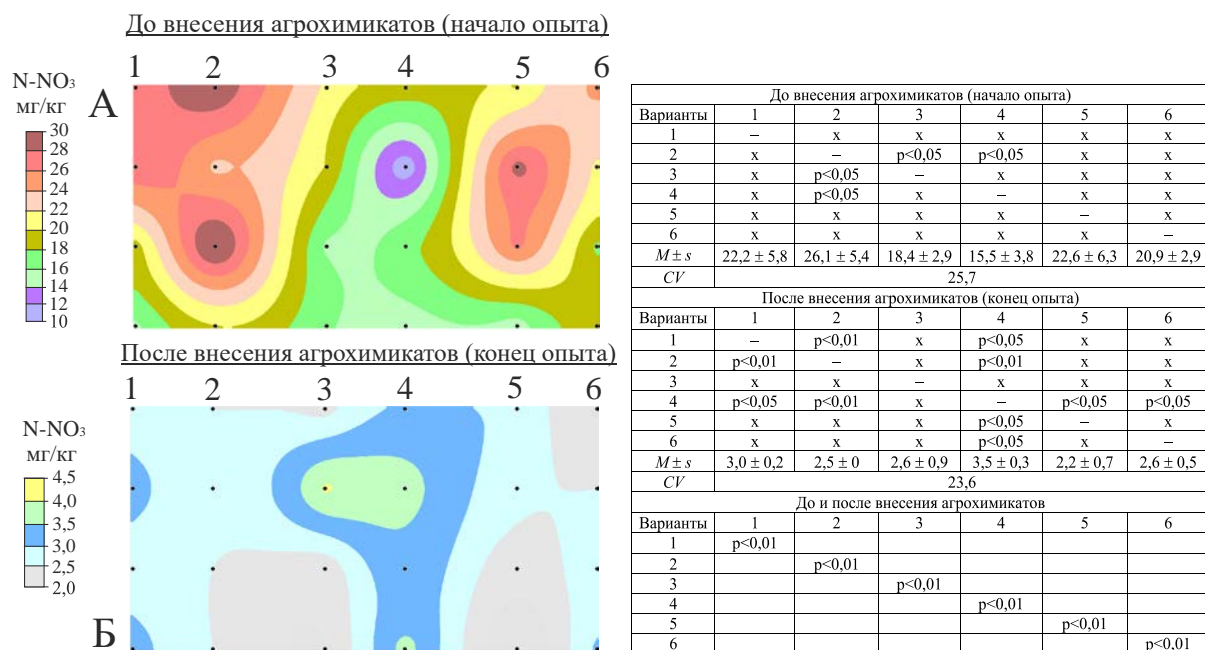


Рисунок 7. Картограммы содержания нитратного азота в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

После внесения агрохимикатов почва контрольного варианта 1 отличалась от варианта 2 более высоким содержанием нитратного азота в 1,3 раза, а по сравнению с вариантом 4 – более низким в 1,2 раза. В варианте 4 содержание нитратного азота в почве было в 1,2–1,6 раза выше, чем во всех остальных вариантах, за исключением варианта 3, где различия между его содержанием в почве сравниваемых вариантов были не значимы (рис. 7, Б). Содержание нитратного азота в почве после уборки урожая снизилось в 7–10 раз относительно вариантов до внесения удобрений, что связано с выносом урожаем. Кроме этого, в осенний период происходит охлаждение почвы, которое приводит к угнетению микробиологической активности и снижению содержания нитратного азота в почве. Содержание нитратного азота в почве после внесения агрохимикатов и сбора урожая брокколи было низким.

Степень интенсивности вариации содержания нитратного азота до и после внесения агрохимикатов характеризуется как умеренная (CV от 10 до 25 %) в обоих случаях (рис. 7, А, Б).

Пространственно-временная изменчивость содержания общего, подвижного, труднодоступного и органического фосфора в почве. По содержанию подвижного фосфора почва различных вариантов опыта до внесения агрохимикатов не отличалась между собой, за исключением варианта 4, где наблюдалось более высокое его содержание по сравнению с вариантами 1 и 6 (рис. 8, А). Согласно разработанным градациям (Методические указания..., 2003), серая лесная почва во всех вариантах опытного участка относилась к группе с очень высоким (> 200 мг P₂O₅/кг) содержанием подвижного фосфора.

После применения агрохимикатов почва варианта 4 отличалась от всех остальных меньшим содержанием подвижного фосфора в 1,4–1,5 раза. В почве варианта 2 его содержание было в 1,1 раза выше, чем в почве варианта 6 (рис. 8, Б). Существенных различий в содержании подвижного фосфора в почве между вариантами с разными сроками отбора проб не выявлено, за исключением варианта 4, в котором внесение доломитовой муки привело к снижению его содержания в 1,4–1,5 раза. Среднее содержание подвижного фосфора до внесения доломитовой муки составляло 255 мг P₂O₅ /кг, а после внесения – 176 мг P₂O₅ /кг. Почва до внесения доломитовой муки относилась к группе с очень высоким содержанием подвижного фосфора, а после ее внесения была отнесена к группе с более низким, но также высоким содержанием. Наблюдаемый эффект связан с иммобилизацией фосфора в труднорастворимых фосфатах, содержание которых в почве варианта 4 увеличилось на 22% (рис. 9, Б). Таким образом, под действием кальция и магния, содержащихся в доломитовой муке, происходит химическая иммобилизация фосфора и последующая трансформация фосфатного состояния почв.

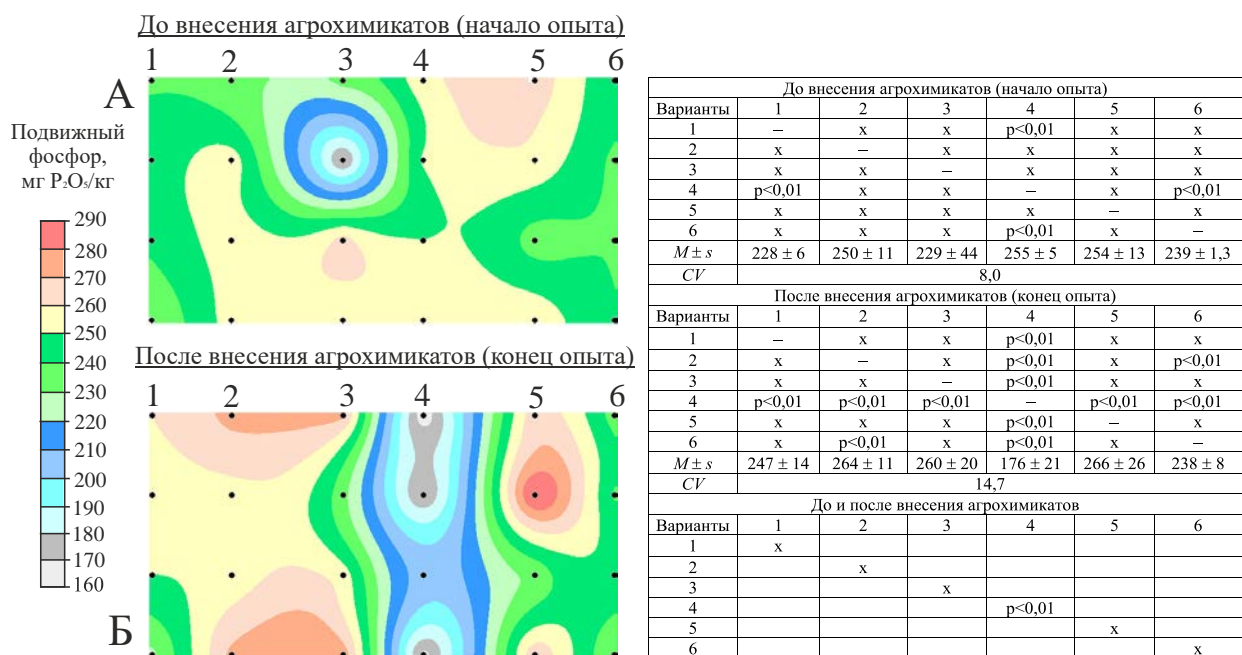


Рисунок 8. Картограммы содержания подвижного фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

С одной стороны, химическое связывание фосфат-иона кальцием, магнием и органическими соединениями предотвращает его вымывание из почвы, что благоприятно отражается на фосфатном состоянии почв, а, с другой, внесение кальцийсодержащих соединений снижает пул его подвижных форм и может вызвать дефицит элемента при выращивании культур на почвах с его низким содержанием. Изучаемая почва не относилась к категории с низким содержанием подвижного фосфора и в соцветиях брокколи, выращенной с внесением доломита на фоне NPK-удобрений, не отмечался дефицит фосфора. Напротив, его содержание соответствовало оптимуму – 0,62%, и по сравнению с другими вариантами опыта было максимальным (табл. 4). Следовательно, такой нежелательный процесс как химическая иммобилизация фосфора в почвах с

высоким содержанием его подвижных форм не оказывает отрицательного влияния на поглощение фосфора растениями.

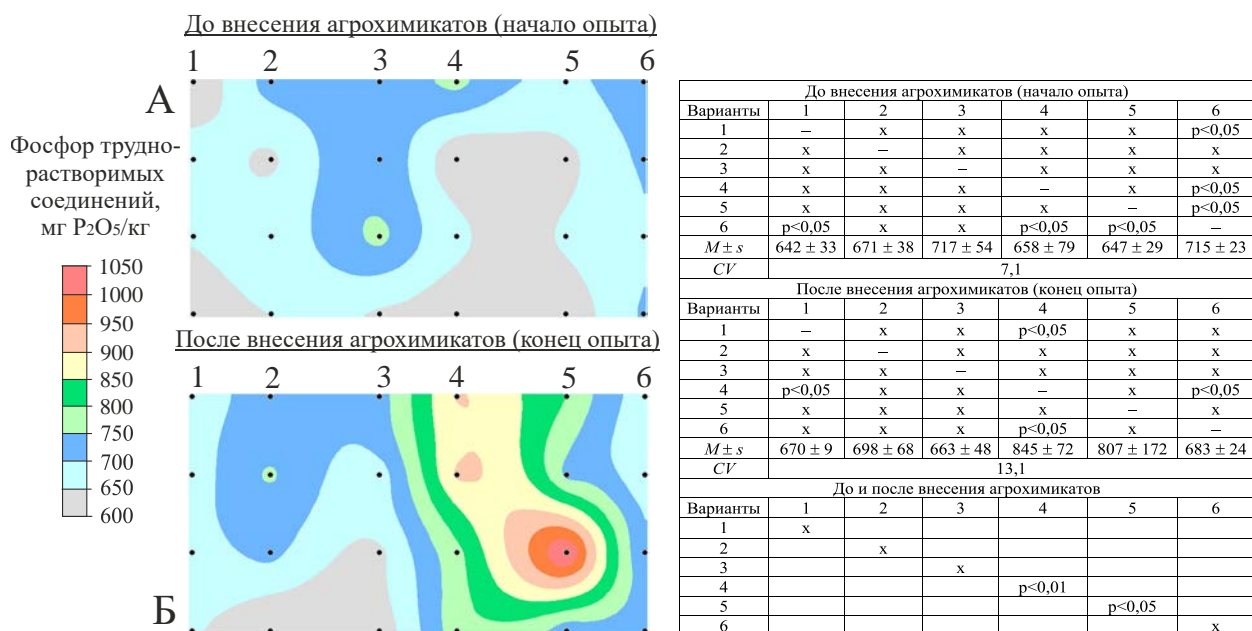


Рисунок 9. Картограммы содержания труднорастворимых соединений фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Анализ динамики содержания общего фосфора в почве до и после внесения фосфорных удобрений показал, что в почве вариантов 2, 3, 4, 5 и 6 наблюдалось увеличение его содержания на 2,6–3,6% (рис. 10 А, Б).

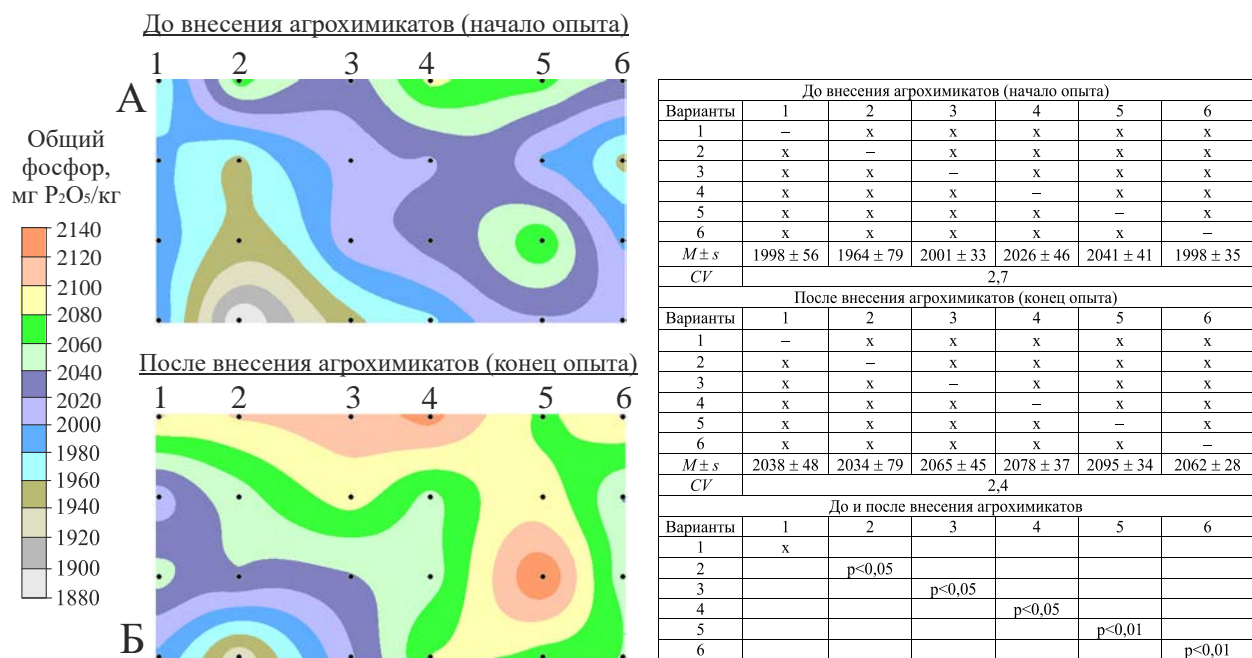


Рисунок 10. Картограммы содержания общего фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание органического фосфора увеличилось в почве вариантов 3 и 6 в среднем на 8%, что связано с влиянием органических кислот, внесенных дополнительно с удобрениями, и способствующих иммобилизации фосфора в органоинеральных соединениях (рис. 11, А, Б).

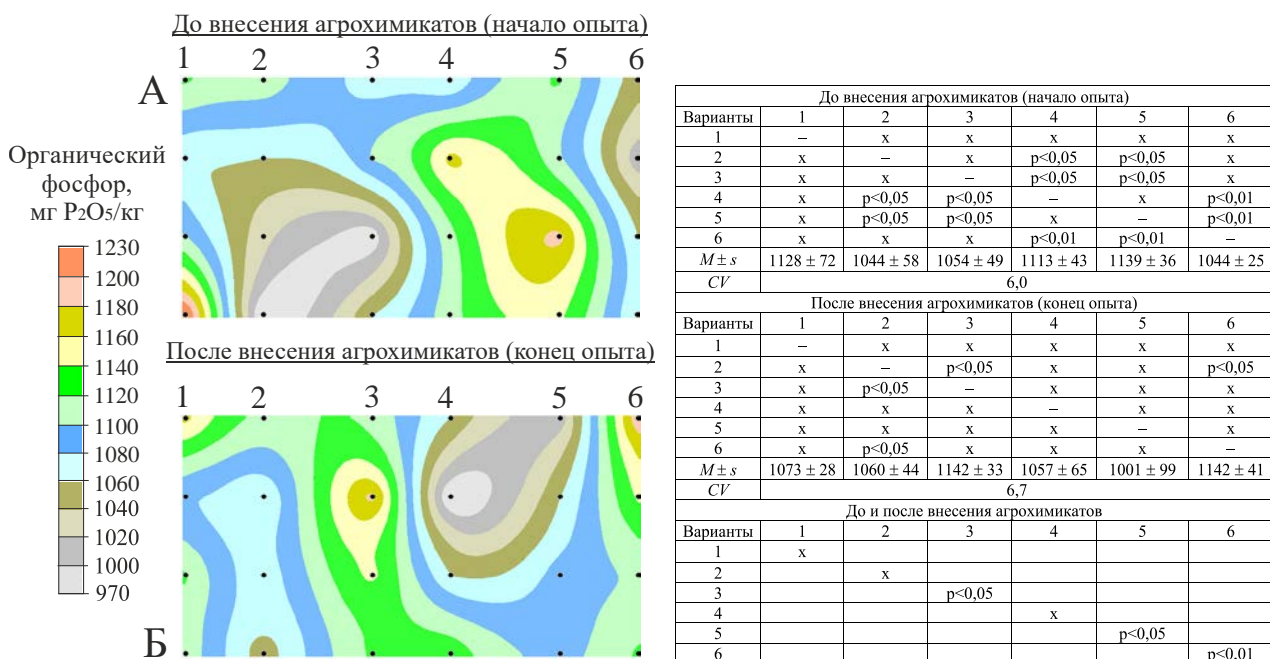


Рисунок 11. Картограммы содержания органического фосфора в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Таким образом, не использованный растениями фосфор активно иммобилизуется в результате химического взаимодействия веществ (фосфорных удобрений и органических кислот), внесенных в почву. Органофосфаты относятся к ближайшим резервам, пополняющим пул подвижного фосфора после их минерализации, поэтому увеличение их содержания благоприятно сказывается на фосфатном состоянии почв и предотвращает его вымывание фильтрационными водами в нижележащие горизонты. В почве варианта 5 содержание органического фосфора снизилось на 12% по отношению к соответствующему варианту до внесения агрохимикатов и сырой мульчи (рис. 11, Б). В варианте 2 такого эффекта не наблюдали, следовательно, соединения, образовавшиеся в почве 5-го варианта после разложения сырой мульчи способствовали переводу некоторой части органического фосфора в труднорастворимые формы, содержание которых в свою очередь увеличилось на 20% (рис. 11, Б).

Степень интенсивности вариации содержания общего, подвижного, труднорастворимого и органического фосфора до внесения агрохимикатов была слабой ($CV < 10\%$). После внесения агрохимикатов этот показатель для подвижного и труднорастворимого фосфора увеличился более чем в 2 раза и стал умеренным (рис. 8, 9), а для содержания общего фосфора после внесения агрохимикатов существенно не изменился (рис. 10).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного и необменного калия в почве. Различия по содержанию обменного калия в почве различных вариантов опыта до внесения агрохимикатов были не существенны (рис. 12, А). Согласно разработанным грациям (Методические указания..., 2003), агросерая почва всех вариантов опытного участка относилась к группе со средним (101-150 мг K₂O/кг) содержанием обменного калия. После применения агрохимикатов содержание обменного калия в вариантах 2, 3, 4, 5 увеличилось на 34–88% относительно соответствующих вариантов до применения агрохимикатов. Почва в вариантах 2, 3, 4, 5 после внесения калийных удобрений и сбора урожая отнесена к группе с повышенным (151–200 мг K₂O/кг) содержанием обменного калия. Среди этих вариантов почва варианта 3 характеризовалась наименьшим содержанием обменного калия (рис. 12, Б).

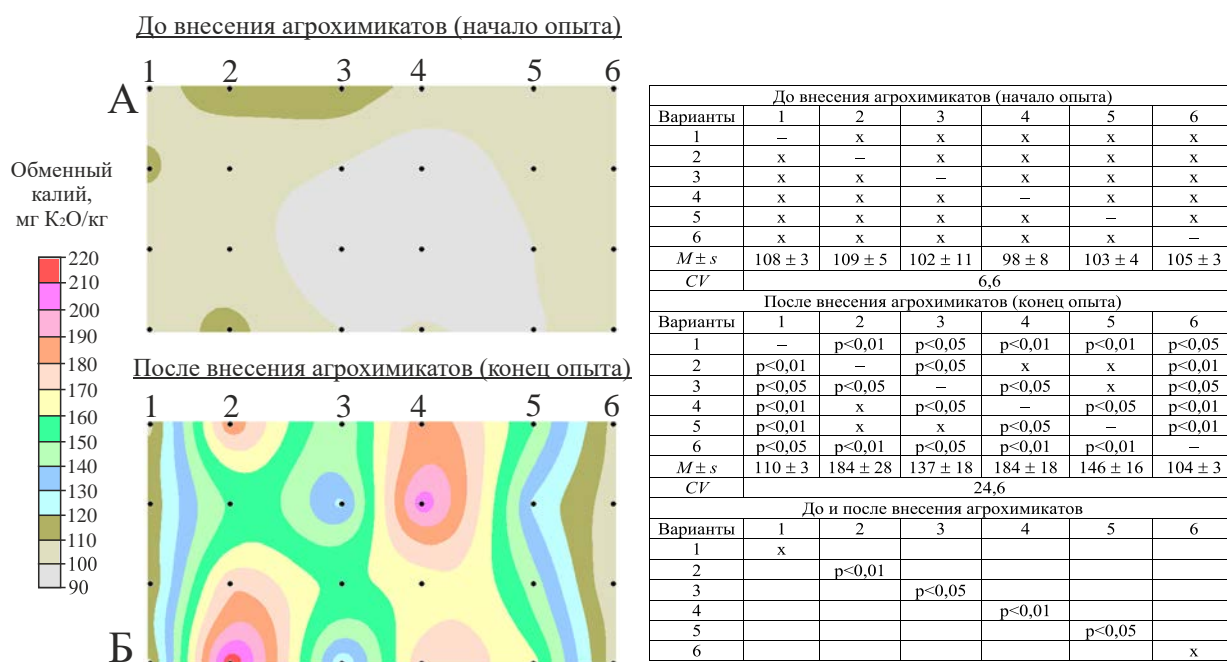


Рисунок 12. Картограммы содержания обменного калия в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Внесение калийных удобрений не способствовало увеличению содержания необменного калия в почве (рис. 13, А, Б).

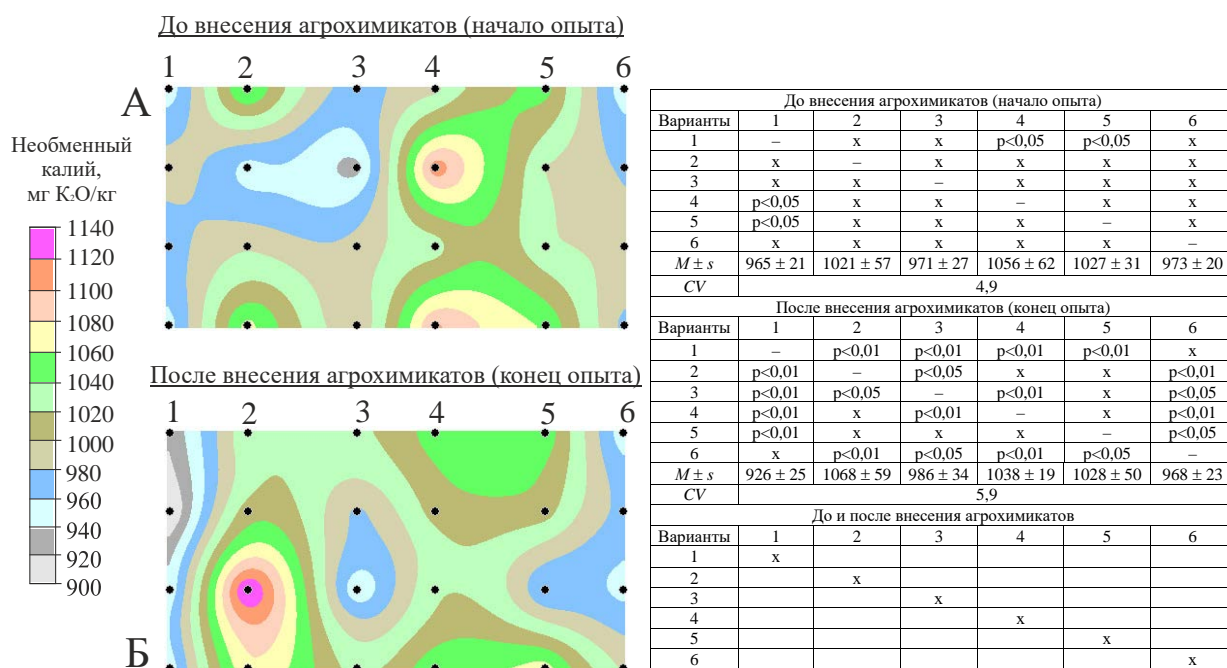


Рисунок 13. Картограммы содержания необменного калия в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Степень интенсивности вариации содержания обменного калия до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) и умеренная (CV от 10 до 25 %), а необменного калия – как слабая ($CV < 10\%$) в обоих случаях (рис. 12, 13).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного кальция в почве.

Статистические сравнения перед применением агрохимикатов показали, что различия в содержании обменного кальция в почве всех вариантов незначительны (рис. 14 А). Согласно разработанной градации (Методические указания..., 2003), почва опытного участка относилась к группе с повышенным содержанием обменного кальция (10,1-15,0 смоль (+)/кг).

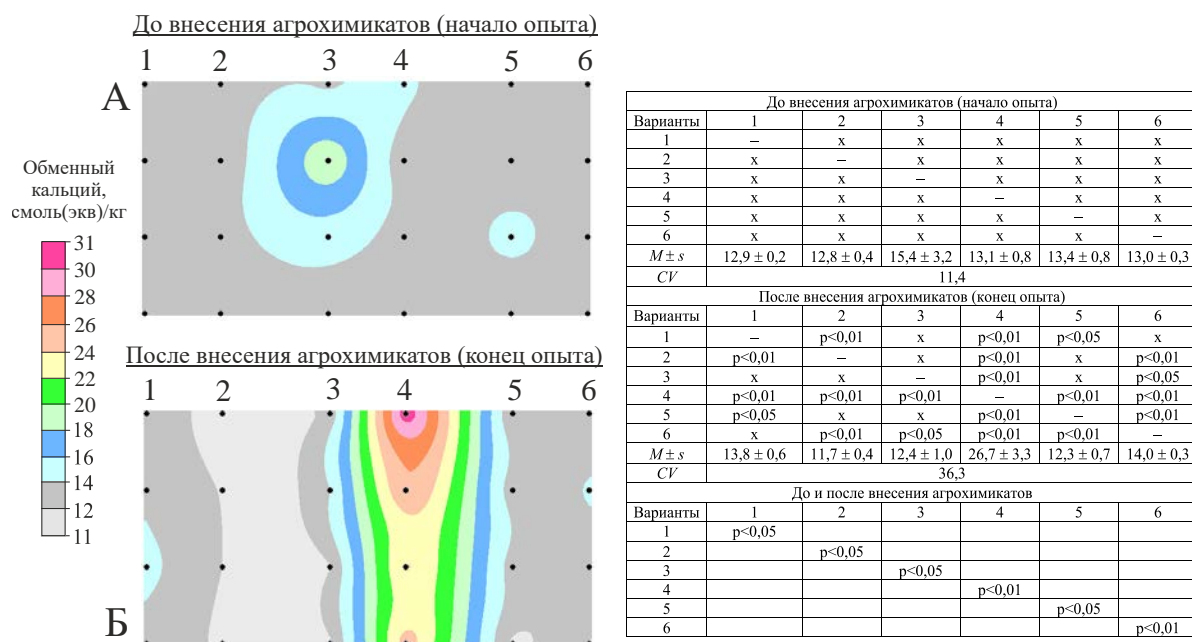


Рисунок 14. Картограммы содержания обменного кальция в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

После уборки урожая брокколи в почве вариантов 1 и 6 содержание обменного кальция увеличилось на 7%, что связано с поступлением кальция с поливной водой, при этом произошло подщелачивание почвы (рис. 14, А, Б; рис. 5 Б). Внесение фосфорных удобрений в почву вариантов 2, 3 и 5 привело к снижению содержания обменного кальция на 7–24%, которое связано с его иммобилизацией в труднорастворимых фосфатах кальция.

Внесение доломитовой муки в почву варианта 4 способствовало увеличению содержания обменного кальция в два раза относительно варианта до ее внесения (рис. 14, Б). Почва варианта 4 до внесения доломитовой муки относилась к группе с повышенным (10,1–15,0 смоль(+)/кг) содержанием обменного кальция, а после ее внесения отнесена к группе с очень высоким (>20 смоль(+)/кг) его содержанием.

Степень интенсивности вариации содержания обменного кальция до и после внесения агрохимикатов характеризовалась как умеренная и сильная, с увеличением после внесения агрохимикатов в 3 раза (рис. 14).

Пространственно-временная изменчивость содержания обменного магния в почве.

Согласно разработанным градациям (Методические указания..., 2003), агросерая почва опытного участка перед применением агрохимикатов относилась к группе со средним (1,1–2,0 смоль(экв)/кг) содержанием обменного магния. Статистические сравнения показали отсутствие различий в содержании обменного магния в почве всех вариантов (рис. 15, А).

Внесение агрохимикатов не оказало значительного влияния на изменение содержания обменного магния в почве (рис. 15 Б). Внесенные в почву калий хлористый, магниевый и доломит содержали в своем составе магний, однако в вариантах 2, 3, 4, 5 увеличения содержания обменного магния в почве не наблюдалось. По всей видимости, это связано с иммобилизацией магния в труднорастворимых фосфатах и поглощением растениями брокколи. Однако, явного увеличения содержания магния в соцветиях брокколи этих вариантов не наблюдалось (табл. 4).

Степень интенсивности вариации содержания обменного магния до и после внесения агрохимикатов характеризуется как слабая ($CV < 10\%$) (рис. 15, А, Б).

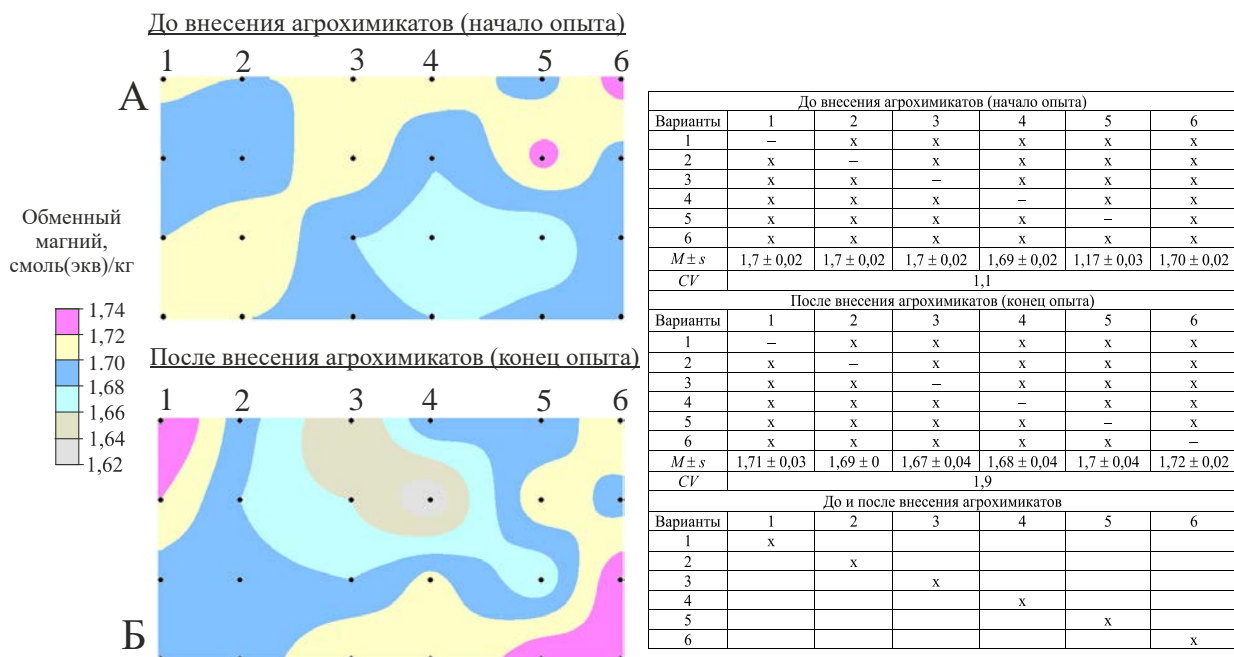


Рисунок 15. Картограммы содержания обменного магния в почве до и после внесения агрохимикатов. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Пространственная изменчивость массы соцветий брокколи и ее сравнительная оценка в вариантах опыта. Визуальное сравнение показало, что как в контрольном варианте, так и в вариантах с внесением удобрений встречаются соцветия с небольшим диаметром (рис. 16, 17). Брокколи характеризуется неравномерным созреванием соцветий в связи с генотипическими особенностями, поэтому соцветия убирали в разные сроки, по достижении ими максимальной зрелости (рис. 18).



Рисунок 16. Внешний вид брокколи в период начала уборки урожая (17.08.2016 г.).

Внесение агрохимикатов способствовало увеличению массы соцветий на 80–83% во втором и третьем вариантах относительно контрольного варианта без удобрений, с максимальным

значением в варианте 2 (табл. 4). В вариантах 4, 5 и 6 различия с контролем были не достоверны. Отличия по средней массе соцветий брокколи в вариантах 2, 3, 4, 5 и 6 с внесением агрохимикатов были не существенны (табл. 4). Степень интенсивности вариации массы соцветий брокколи составила 33% и характеризовалась как сильная ($CV > 25\%$).



Рисунок 17. Диаметр соцветий брокколи на начало уборки (17.08.2016 г.).

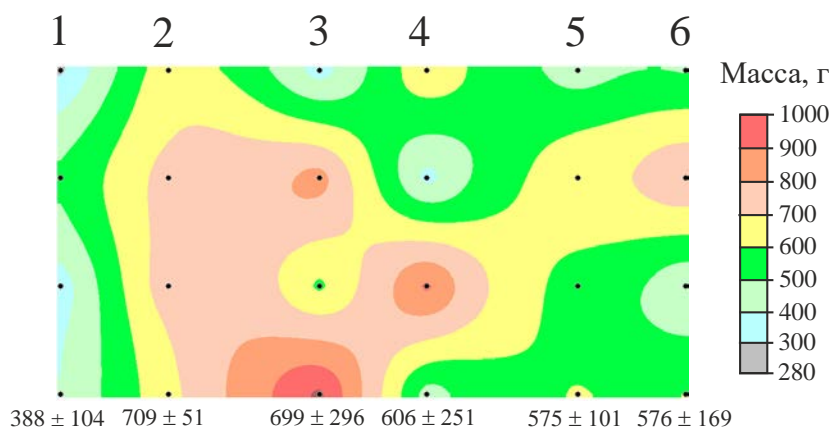


Рисунок 18. Картограмма массы соцветий брокколи. Варианты опыта: 1 – контроль (без удобрений); 2 – Фон (N100P60K160); 3 – Фон+янтарная кислота; 4 – Фон+доломит; 5 – Фон+мульча; 6 – ОМУ «Криалл» (N30P30K40).

Содержание азота, фосфора и калия в соцветиях брокколи было оптимальным во всех вариантах опыта (табл. 4). Отмечено большее содержание общего азота в соцветиях брокколи в варианте 4. По всей видимости, это связано с увеличением поглощения этого элемента растениями при нейтральной реакции среды почвы, изменение которой произошло благодаря внесению доломитовой муки. Известно, что брокколи по содержанию незаменимых аминокислот в белке не уступает говядине, поэтому такой приём, как внесение доломита совместно с азотными удобрениями, позволит увеличить содержание азота и соответственно незаменимых аминокислот

в белке брокколи и повысить питательную ценность этого овоща (табл. 4). В вариантах 5 и 6 наблюдалось снижение содержания общего азота в соцветиях по отношению ко всем вариантам опыта, а в варианте 3 отличия с контролем по этому показателю были не существенны.

Таблица 4

Масса соцветий брокколи (среднее \pm стандартное отклонение) и их химический состав

Варианты	Средняя масса основных соцветий, г	Средняя масса боковых соцветий*, г	Среднее содержание, в % на абс. сухое вещество				
			N	P	K	Ca	Mg
1. Контроль	388 ^a \pm 104	54 ^a \pm 58	3,89 ^a	0,56 ^a	2,69 ^a	0,28 ^a	0,17 ^a
2. Фон (N100P60K160)	709 ^b \pm 51	56 ^a \pm 56	3,99 ^b	0,54 ^b	2,86 ^b	0,29 ^a	0,19 ^b
3. Фон+янтарная к-та	699 ^b \pm 296	136 ^a \pm 129	3,88 ^a	0,58 ^c	2,93 ^c	0,24 ^b	0,18 ^{ab}
4. Фон+доломит	606 ^{ab} \pm 251	88 ^a \pm 49	4,02 ^c	0,62 ^d	2,97 ^d	0,24 ^b	0,19 ^b
5. Фон+мульча	575 ^{ab} \pm 100	110 ^a \pm 82	3,72 ^d	0,60 ^e	3,04 ^e	0,25 ^b	0,18 ^{ab}
6. ОМУ «Криалл»	576 ^{ab} \pm 168	39 ^a \pm 44	3,84 ^c	0,60 ^e	2,93 ^c	0,28 ^a	0,17 ^a
НСР _{0,05}	273	108	0,012	0,013	0,018	0,012	0,012

Примечание: *боковые соцветия формируются после срезки основных соцветий; средние значения, за которыми следует одна и та же буква в столбце и для одного и того же свойства, существенно не различаются при $p \leq 0,05$.

По содержанию фосфора и калия в соцветиях различия достоверны во всех вариантах опыта (табл. 4). Наибольшее содержание фосфора в соцветиях наблюдалось в варианте 4, а калия в варианте 5. Содержание кальция в соцветиях брокколи было оптимальным во всех вариантах. Однако в вариантах 3, 4 и 5 выявлено существенное снижение содержания этого элемента в соцветиях брокколи по отношению к контролю (табл. 4). Содержание магния в соцветиях брокколи достоверно было выше в вариантах 2 и 4. Согласно разработанным грациями (Агрохимические методы..., 1975; Kalra, 1998), содержание элементов (N, P, K, Ca, Mg) в соцветиях было оптимальным во всех вариантах опыта.

Изучение корреляционных матриц показало, что зависимости между весом соцветий брокколи и почвенными свойствами, определенными до и после внесения агрохимикатов, были незначимы (табл. 5, 6).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) Спирмена (до внесения агрохимикатов, начало опыта)

Почвенные и растительные параметры	pH	C	N-NO ₃	P ₂ O ₅ подв.	P ₂ O ₅ общ.	P ₂ O ₅ орг.	P ₂ O ₅ стр.-раств.	K ₂ Oобщ.	K ₂ Oнеобщ.	Саобщ.	Mgобщ.	Вес соцветий
pH	–	0,52	x	x	0,48	x	0,71	x	x	0,91	x	x
C	0,52	–	x	x	x	x	0,46	x	-0,45	0,54	x	x
N-NO ₃	x	x	–	x	x	x	x	0,50	x	x	x	x
P ₂ O ₅ подв.	x	x	x	–	x	x	x	x	0,47	x	x	x
P ₂ O ₅ общ.	0,48	x	x	x	–	0,43	0,42	x	x	0,42	x	x
P ₂ O ₅ орг.	x	x	x	x	0,43	–	-0,51	x	x	x	x	x
P ₂ O ₅ стр.-раств.	0,71	0,46	x	x	0,42	-0,51	–	x	x	0,60	x	x
K ₂ Oобщ.	x	x	0,50	x	x	x	x	–	x	x	x	x
K ₂ Oнеобщ.	x	-0,45	x	0,47	x	x	x	x	–	-0,28	x	x
Саобщ.	0,91	0,54	x	x	0,42	x	0,60	x	x	–	x	x
Mgобщ.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–	x
Вес соцветий	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

Примечание для табл. 5 и 6. x – корреляция не достигает уровня статистической значимости.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции ($p < 0,05$) Спирмена (после внесения агрохимикатов, конец опыта)

Почвенные и растительные параметры	pH	C	N-NO ₃	P ₂ O ₅ подв.	P ₂ O ₅ общ.	P ₂ O ₅ орг.	P ₂ O ₅ тр.-раств.	K ₂ Oобщ.	K ₂ Oнеобм.	Саобщ.	Mgобщ.	Вес соцветий
pH	–	x	0,70	-0,80	x	x	x	x	x	0,97	x	x
C	x	–	x	x	0,44	x	0,51	x	x	x	x	x
N-NO ₃	0,70	x	–	-0,61	x	x	x	x	x	0,71	x	x
P ₂ O ₅ подв.	-0,80	x	-0,61	–	x	x	x	x	x	-0,83	x	x
P ₂ O ₅ общ.	x	0,44	x	x	–	x	0,60	x	x	x	x	x
P ₂ O ₅ орг.	x	x	x	x	x	–	-0,60	-0,53	-0,50	x	x	x
P ₂ O ₅ тр.-раств.	x	0,51	x	x	0,60	-0,60	–	0,42	0,43	x	x	x
K ₂ Oобщ.	x	x	x	x	x	-0,53	0,42	–	0,71	x	x	x
K ₂ Oнеобм.	x	x	x	x	x	-0,50	0,43	0,71	–	x	x	x
Саобщ.	0,97	x	0,71	-0,83	x	x	x	x	x	–	x	x
Mgобщ.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–	x
Вес соцветий	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	–

Таким образом, можно сделать вывод о ключевой роли генотипических особенностей брокколи в наращивании массы соцветий брокколи и применение агрохимикатов не способствовало выравниванию этого показателя.

Экономический эффект от применения агрохимикатов. Расчет окупаемости агрохимикатов показал эффективность минеральных удобрений во всех вариантах опыта (табл. 7).

Таблица 7

Окупаемость NPK удобрений по вариантам*

Варианты опыта	Урожайность брокколи, т/га	Прибавка, т/га	Затраты на средства химизации	Стоимость всей продукции	Доход от применения NPK удобрений	Окупаемость 1 кг д.в. NPK удобрений прибавкой урожая, кг	Окупаемость 1 кг физ. веса NPK удобрений прибавкой урожая, кг
			тыс. руб./га				
1. Контроль	15,5	–	–	1240	–	–	–
2. Фон N100P60K160	28,4	12,9	16,1	2272	1032	40,3	18,7
3. Фон+янтарная к-та	27,9	12,4	17,3	2232	992	38,8	17,9
4. Фон+доломит	24,3	8,8	17,5	1944	704	27,5	12,7
5. Фон+мульча	22,9	7,4	18,1	1832	592	23,1	10,7
6. ОМУ «Криалл»	23,1	7,6	60,0	1848	608	76	6,3

Примечание. * Затраты на средства химизации рассчитывались при стоимости 1 кг удобрений (руб.): аммиачная селитра – 22, двойной суперфосфат – 22, калий хлористый – 23, ОМУ «Криалл» – 50. Стоимость 1 кг брокколи – 80 руб.

Максимальная окупаемость 1 кг д.в. NPK удобрений прибавкой урожая составила 76 кг и получена в варианте ОМУ «Криалл», однако в этом варианте окупаемость по физическому весу удобрения была значительно ниже по сравнению с остальными вариантами, при этом затраты на покупку этого удобрения в 3–4 раза выше по сравнению с минеральными удобрениями. В вариантах 2–5 с применением минеральных удобрений максимальная окупаемость получена в варианте 2 и составила 40,3 кг. Таким образом, дополнительные средства (янтарная кислота,

доломит, мульча), внесенные совместно с удобрениями, не привели к значительному увеличению урожайности брокколи. Однако, следует учитывать то, что внесение минеральных удобрений приводит к подкислению реакции среды почв, которая, в свою очередь, может привести к их деградации и снижению доступности элементов питания для растений. Поэтому внесение кальцийсодержащих агрохимикатов (доломит, известь и т.д.) будет способствовать поддержанию плодородия почв при применении минеральных удобрений.

ВЫВОДЫ

1. Результаты исследований показали, что после внесения агрохимикатов степень интенсивности вариации для некоторых агрохимических свойств почвы изменяется существенно. Для рН, подвижных фосфора, калия и кальция коэффициенты вариации увеличились в два и более раза. Для подвижных фосфора и кальция увеличение коэффициентов вариации вызвано не только применением агрохимикатов, но и процессом связывания элементов в труднорастворимые соединения.

2. Установлено, что даже одногодичное применение агрохимикатов оказало существенное влияние на свойства почвы, которое проявилось в отрицательных (закисление, связывание фосфора, кальция и магния) и положительных (повышение содержания элементов питания) эффектах. Имобилизация элементов питания (фосфора, кальция, магния) в труднорастворимых соединениях в почве и последующее снижение содержания подвижных форм не оказали отрицательного влияния на элементный состав соцветий брокколи. Химическая иммобилизация приводит к закреплению элементов питания в верхнем горизонте почвы и предотвращает их выщелачивание талыми и дождевыми водами в нижние горизонты.

3. Внесение минеральных удобрений, обогащенных гуматом калия, привело к увеличению содержания органического углерода на 3–13% с максимальными значениями в вариантах с дополнительным внесением доломита и сырой мульчи.

4. Использование агрохимикатов повысило урожай и улучшило питательную ценность соцветий брокколи. В вариантах с внесением минеральных удобрений наибольшая окупаемость удобрений получена в варианте Фон – N100P60K160.

5. Не выявлено корреляции между весом соцветий брокколи и почвенными свойствами, определенными до и после внесения агрохимикатов, что свидетельствует о значительном влиянии на массу соцветий генотипических особенностей брокколи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение значимых проблем (совершенствование агротехнологий, экологизация производства, охрана окружающей среды, обеспечение продовольствием страны) должно осуществляться путем разработки научно-обоснованных подходов, которые позволят снизить затраты на покупку минеральных удобрений и устранить их отрицательное влияние на почву и в целом на окружающую среду.

В варианте с внесением органо-минерального удобрения «Криалл», в котором доза внесенного азота была равной 30 кг/га д.в., урожайность брокколи не отличалась от других вариантов с внесением минеральных удобрений, где доза была в 3 раза выше, поэтому дозу азотных минеральных удобрений при выращивании брокколи можно снизить в три раза для достижения максимального экономического эффекта от применения азотных удобрений и снижения отрицательного воздействия на окружающую среду.

Исследованная агросерая почва характеризовалась высоким содержанием подвижного фосфора, следовательно, фосфорные удобрения на такой почве можно было не применять. Многие земледельцы не принимают во внимание этот факт и используют рекомендации, которые часто не учитывают имеющееся плодородие почв. Такой подход приводит к нерациональному использованию удобрений, неоправданным финансовым затратам, загрязнению окружающей среды и изменению свойств почв не в лучшую сторону, например, подкислению реакции среды.

Дозу вносимых калийных удобрений при среднем (101–150 мг K₂O/кг) содержании калия в почве можно оставить без изменений – 160 кг/га д.в. Однако даже однократное применение калийных удобрений привело к существенному улучшению калийного статуса почвы (уровень обменного калия изменился со среднего до повышенного); следовательно, если ежегодное внесение калийных удобрений приведет к чрезмерно высокому уровню содержания обменного калия в почве, то дальнейшее применение калийных удобрений в высоких дозах будет приводить

к материальным издержкам и нарушению баланса питательных веществ в почве и минерального питания растений. Таким образом, если в хозяйствах вносятся высокие дозы удобрений, то диагностику почвы на содержание элементов питания необходимо проводить через каждые два года, чтобы принять правильные решения о дозах вносимых удобрений и скорректировать их при применении удобрений в следующем году.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность к.б.н. О.А. Савенкову за определение содержания общего азота в растительных образцах на CHN-анализаторе, Н.А. Галузо, Л.Д. Черепахиной и О.А. Писаревой за помощь в проведении лабораторно-аналитических работ.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа подготовлена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. *Атлас Новосибирской области* / Ред. коллегия: В.М. Кравцов, Р.П. Донукалова, В.И. Левакова, П.В. Ленин, Г.М. Позднякова. Москва: Роскартография, 2002. 56 с.
3. *Афанасьев В.Н., Цытин А.П.* Эконометрика в пакете STATISTICA: учебное пособие по выполнению лабораторных работ. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 204 с.
4. *Вдовин В.В., Малолетко А.М.* История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Алтае-Саянская горная область. М.: Наука, 1969. С. 121–154.
5. *Елисеева И.И., Юзбашев М.М.* Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2002. 480 с.
6. *Демьянов В.В., Савельева Е.А.* Геостатистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
7. *Инновационные технологии производства новых овощных культур в Ростовской области (салатные линии, пекинская капуста, брокколи, томат-черри, огурец корншонного типа, сахарная кукуруза)*. Научно-практические рекомендации. г. Ростов-на-Дону, 2012. 144 с.
8. *Красильников П.В.* Вариография дискретных почвенных свойств / В кн.: Экология и география почв. Петрозаводск: Изд-во Института биологии КарНЦ РАН, 2009. С. 10–30.
9. *Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения*. Под редакцией Л.М. Державина, Д.С. Булгакова М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
10. *Мешалкина Ю.Л., Васнев И.И., Кузякова И.Ф., Романенков В.А.* Геостатистика в почвоведении и экологии. М.: РГАУ-МСХА, 2010. 95 с.
11. *Минеев В.Г.* Агрохимия: Учебник. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Издательство МГУ, Издательство «Колос», 2004. 720 с.
12. *Полевой определитель почв России*. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
13. *Потапова Д.А., Рендюк Т.Д., Дул В.Н., Чупарина Е.В.* Элементный состав капусты брокколи (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica* Plenck) // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине», 2016. С. 404–406.
14. *Почвы совхоза «Железнодорожный» Новосибирского района Новосибирской области и рекомендации по их использованию*. Новосибирск: ЗАПСИБГИПРОЗЕМ, 1982. 54 с.
15. *Практикум по агрохимии*: Учеб. пособие. 2-е изд. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
16. *Фотев Ю.В., Артемьева А.М., Фатеев Д.А., Наумова Н.Б., Бугровская Г.А., Белоусова В.П., Кукушкина Т.А.* Особенности морфологии, биохимического состава и генетического полиморфизма китайской брокколи – новой для России овощной культуры // *Овощи России*. 2018. № 1(39). С. 12–19. DOI: [10.18619/2072-9146-2018-1-12-19](https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-12-19)
17. *Ali M., Abustan I.* A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*. 2014. Vol. 4. pp. 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
18. *Arrouays D., McBratney A., Minasny B., Hempel J., Heuvelink G., MacMillan R., Hartemink A., Lagacherie P., McKenzie N.* The Global Soil Map project specifications. In: Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., Richer de Forges A., McBratney A.B. (ed) *Global Soil Map: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proceedings of the 1st Global Soil Map Conference*. Orleans, 2014. France, CRC Press, pp. 9–12.
19. *Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., Konopka A.E.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994. Vol. 58. pp. 1501–1511.

20. Chen S., Martin M.P., Saby N.P., Walter C., Angers D.A., Arrouays D. Fine resolution map of top-and subsoil carbon sequestration potential in France // *Sci Total Environ.* 2018. Vol. 630. pp.389–400. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.209](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.209)
21. Gastal F., Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective // *J Exp Bot.* 2002. Vol. 53(370). pp. 789–799. DOI: [10.1093/jexbot/53.370.789](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789)
22. Geng Y., Cao G., Wang L., Wang S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution // *PLoS ONE.* 2019. No. 14(7). DOI: [10.1371/journal.pone.0219512](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512)
23. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The Methods of Geomorphometry and Digital Soil Mapping for Assessing Spatial Variability in the Properties of Agrogray Soils on a Slope // *Eurasian Soil Science.* 2017. Vol. 50. pp. 20–29. DOI: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
24. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative Capacity of NDVI in Predictive Mapping of the Properties of Plow Horizons of Soils on Slopes in the South of Western Siberia // *Eurasian Soil Science.* 2017. Vol. 50. pp. 1332–1343. DOI: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
25. Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York. 1997.
26. Govers G., Merckx R., van Wesemael B., Van Oost K. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL.* 2017. Vol. 3 pp. 45–59. DOI: [10.5194/soil-3-45-2017](https://doi.org/10.5194/soil-3-45-2017)
27. Hengl T.A. Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. Ispra (Italy): EC JRC, 2007. 165 p.
28. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure // *Scandinavian Journal of Statistics.* 1979. Vol. 6. No. 2. pp. 65–70.
29. Isaaks E. H., Srivastava R.M. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989.
30. Kalra Y.P. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, Boston. 1998. 287 p.
31. Lal R., Hall G.F., Miller F.P. Soil degradation: I. Basic processes // *Land Degrad Dev.* 1989. Vol. 1. pp. 51–69.
32. Oldeman L.R. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. 1988. No. 88/4, ISRIC, Wageningen.
33. Oliver M.A. Geostatistical applications for precision agriculture. London: Springer, 2010.
34. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL.* 2019. Vol. 5. pp. 79–89. DOI: [10.5194/soil-5-79-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019)
35. Pannatier Y. Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York: Springer-Verlag, 1996. 91 p.
36. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environ Dev Sustain.* 2006. Vol. 8. pp. 119–137. DOI: [10.1007/s10668-005-1262-8](https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8)
37. Razis A.F.A., Noor N.M. Cruciferous vegetables: Dietary phytochemicals for cancer prevention // *Asian Pac. J. Cancer Prev.* 2013. Vol. 14. pp. 1565–1570. DOI: [10.7314/apjcp.2013.14.3.1565](https://doi.org/10.7314/apjcp.2013.14.3.1565)
38. Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004-08, 2004. pp. 1–24. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/94220/ISWSCR2004-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
39. Soil organic carbon mapping Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2018.
40. Soil Sampling and Methods of Analysis / Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008. 1224 p.
41. Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M. The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021. 10. 243. DOI: [10.3390/ijgi10040243](https://doi.org/10.3390/ijgi10040243)
42. Sumfleth K., Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators // *Ecol Indic.* 2008. Vol. 8 (5). pp. 485–501. DOI: [10.1016/j.ecolind.2007.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.05.005)
43. Verhoeven D.T., Goldbohm R.A., van Poppel G., Verhagen H., van den Brandt P.A. Epidemiological studies on Brassica vegetables and cancer risk // *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 1996. Vol. 5. pp. 733–748.

Поступила в редакцию 24.09.2021

Принята 02.12.2021

Опубликована 12.12.2021

Сведения об авторах:

Гопп Наталья Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия); gopp@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

EFFECT OF AGROCHEMICALS ON SPATIO-TEMPORAL CHANGES IN SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND BROCCOLI YIELD

© 2021 N. V. Gopp 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: gopp@issa-siberia.ru

The aim of the study. *The aim of the study was to examine the effect of agrochemicals (mineral and organo-mineral fertilizers, plant growth regulators and ameliorants) on the spatio-temporal changes in the properties of agro-gray soil and broccoli yield using a cartographic approach.*

Methodology. *The field experiment was conducted in 2016 at the site located near the Bykovo village in the south-east of West Siberia (54°58'02.8" N; 83°5'21.45" E, Novosibirsk region). The objects of the study were the agro-gray soil (Luvic Retic Greyzem Phaeozem (Siltic, Aric)) and the medium-ripe broccoli cabbage variety "Linda". The experiment scheme included the following treatments: (1) Control (without fertilizers), (2) Background (N100P60K160), (3) Background + succinic acid, (4) Background + dolomite, (5) Background + mulch, (6) Organo-mineral fertilizer "Criall". Soil samples were analyzed for the content of organic carbon, nitrates, total, mineral and organic phosphorus, as well as its mobile form; exchangeable potassium, calcium and magnesium, and pH. The dried samples of broccoli inflorescences were analyzed for the total content of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium.*

Main results. *After applying agrochemicals and harvesting broccoli, the variation coefficients of pH, mobile phosphorus, potassium and calcium increased by two or more times. The use of agrochemicals increased the yield and improved the nutritional value of broccoli inflorescences. The treatments with mineral fertilization (2, 3, 4 and 5) the treatment 2 (Background N100P60K160) provided the greatest return. The application of the studied agrochemicals resulted in the negative (acidification, binding of phosphorus, calcium and magnesium) and positive (increase in the content of elements) effects. The immobilization of nutrients (phosphorus, calcium, magnesium) in poorly soluble soil compounds and the respective decrease in the content of the elements' mobile forms did not have a negative effect on the elemental composition of broccoli inflorescences. Thus, chemical immobilization, leading to the fixation of nutrients in the upper soil horizon, prevents their leaching by melt- and rainwater into the lower horizons.*

Key words: *geostatistics; kriging; dolomite; fertilizers; pH; nitrogen; phosphorus; potassium; calcium; magnesium*

How to cite: *Gopp N.V. Effect of agrochemicals on spatio-temporal changes in soil agrochemical properties and yield of broccoli // The Journal of Soils and Environment. 2021. 4(2). e157. doi: [10.31251/pos.v4i2.157](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.157) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

1. *Agrochemical Methods of Soil Studies*. Moscow, Nauka, 1975, 656 p. (in Russian).
2. Kravtsov V.M., Donukalova R.P., Levakova V.I., Lepin P.V., Pozdnyakova G.M. Collection of maps of the Novosibirsk region. Moscow, Roskartografiya, 2002, 56 p. (in Russian)
3. Afanas'ev V.N., Tsypin A.P. Econometrics in STATISTICA Software: Manual for Laboratory Practicum. Orenburg State Univ., Orenburg, 2008. 204 p. (in Russian)
4. Vdovin V.V., Maloletko A.M. The history of the development of the relief of Siberia and the Russian Far East. Altai-Sayan mountainous region. Moscow, Nauka, 1969, pp. 121–154. (in Russian)
5. Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. General theory of statistics. Finance and Statistics, Moscow, 2002, 480 p. (in Russian)
6. Demyanov V.V., Savelyeva E.A. Geostatistics. Theory and practice. Moscow: Nauka, 2010. 327 p. (in Russian)
7. *Innovative technologies for the production of new vegetable crops in the Rostov region (salad, Peking cabbage, broccoli, cherry tomato, cucumber, sweet corn)*. Scientific and practical recommendations. Rostov-on-Don, 2012. 144 p.
8. Krasilnikov P.V. Variography of discrete soil properties / In: Ecology and Geography of Soils. Petrozavodsk: Publishing House of the Institute of Biology KarSC RAS, 2009. pp. 10–30.
9. *Guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land*. Editors: Derzhavina L.M., Bulgakova D.S. Moscow, Rosinformagrotech, 2003, 240 p. (in Russian)
10. Meshalkina Yu.L., Vasenev I.I., Kuzyakova I.F., Romanenkov V.A. Geostatistics in soil science and ecology. Moscow: RGAU-ICCA, 2010. 95 p.
11. Mineev V.G. Practical course of agrochemistry. Moscow, MGU, 2001, 720 p. (in Russian)
12. *Field Guide for Correlation of Russian Soils*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute, 2008 (in Russian)

13. Potapova D.A., Rendyuk T.D., Dul V.N., Chuprina E.V. Elemental composition of broccoli cabbage (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica* Plenck) // Collection of scientific papers of the International scientific and Practical Conference "Biological features of medicinal and aromatic plants and their role in medicine", 2016. pp. 404–406. (in Russian)
14. *Soils of the state farm "Zheleznodorozhny" of Novosibirsk region and recommendations for their use.* Novosibirsk, ZAPSIBGIPROZEM, 1982, 54 p. (in Russian)
15. *Practical course of agrochemistry.* Editor: V.G. Mineev. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2001, 689 p. (in Russian)
16. Fotev Yu.V., Artemyeva A.M., Fateev D.A., Naumova N.B., Bugrovskaya G.A., Belousova V.P., Kukushkina T.A. Results of SSR analysis, properties of plant morphology and biochemical composition of Chinese broccoli – a new vegetable crop for Russia // *Vegetables of Russia*, 2018, No. 1(39), pp. 12–19. DOI: [10.18619/2072-9146-2018-1-12-19](https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-12-19) (in Russian)
17. Ali M., Abustan I. A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*. 2014. Vol. 4. pp. 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
18. Arrouays D., McBratney A., Minasny B., Hempel J., Heuvelink G., MacMillan R., Hartemink A., Lagacherie P., McKenzie N. The Global Soil Map project specifications. In: Arrouays D., McKenzie N., Hempel J., Richer de Forges A., McBratney A.B. (ed) *Global Soil Map: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proceedings of the 1st Global Soil Map Conference*. Orleans, France, CRC Press, 2014, pp. 9–12.
19. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., Konopka A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994. Vol. 58. pp. 1501–1511.
20. Chen S., Martin M.P., Saby N.P., Walter C., Angers D.A., Arrouays D. Fine resolution map of top-and subsoil carbon sequestration potential in France // *Sci Total Environ*, 2018, Vol. 630. pp. 389–400. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.02.209](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.209)
21. Gastal F., Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective // *J Exp Bot*, 2002, Vol. 53(370). pp. 789–799. DOI: [10.1093/jexbot/53.370.789](https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789)
22. Geng Y., Cao G., Wang L., Wang S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution // *PLoS ONE*, 2019, Vol. 14(7). DOI: [10.1371/journal.pone.0219512](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512)
23. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. The Methods of Geomorphometry and Digital Soil Mapping for Assessing Spatial Variability in the Properties of Agrogray Soils on a Slope // *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50. pp. 20–29. DOI: [10.1134/S1064229317010082](https://doi.org/10.1134/S1064229317010082)
24. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Indicative Capacity of NDVI in Predictive Mapping of the Properties of Plow Horizons of Soils on Slopes in the South of Western Siberia // *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 1332–1343. DOI: [10.1134/S1064229317110060](https://doi.org/10.1134/S1064229317110060)
25. Goovaerts P. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York, 1997.
26. Govers G., Merckx R., van Wesemael B., Van Oost K. Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. *SOIL*, 2017, Vol. 3. pp. 45–59. DOI: [10.5194/soil-3-45-2017](https://doi.org/10.5194/soil-3-45-2017)
27. Hengl T.A. *Practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*. Ispra (Italy): EC JRC, 2007. 165 p.
28. Holm S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure // *Scandinavian Journal of Statistics*, 1979, Vol. 6., No. 2., pp. 65–70.
29. Isaaks E. H., Srivastava R.M. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 1989.
30. Kalra Y.P. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Boston, 1998. 287 p.
31. Lal R., Hall G.F., Miller F.P. Soil degradation: I. Basic processes // *Land Degrad Dev*, 1989, Vol.1. pp. 51–69.
32. Oldeman L.R. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. ISRIC, Wageningen, 1988, No. 88/4,
33. Oliver M.A. *Geostatistical applications for precision agriculture*. Springer, London, 2010.
34. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL*. 2019. Vol. 5. pp. 79–89. DOI: [10.5194/soil-5-79-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019)
35. Pannatier Y. *Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag, 1996. 91 p.
36. Pimentel D. Soil erosion: A food and environmental threat // *Environ Dev Sustain*, 2006, Vol. 8. pp. 19–137. DOI: [10.1007/s10668-005-1262-8](https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8)
37. Razis A.F.A., Noor N.M. Cruciferous vegetables: Dietary phytochemicals for cancer prevention // *Asian Pac. J. Cancer Prev*. 2013. Vol. 14. pp. 1565–1570. DOI: [10.7314/apjcp.2013.14.3.1565](https://doi.org/10.7314/apjcp.2013.14.3.1565)
38. Singh J., Knapp H.V., Demissie M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey Contract Report 2004–08, 2004. pp. 1–24. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/94220/ISWSCR2004-08.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
39. *Soil organic carbon mapping Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, Rome, 2018.
40. *Soil Sampling and Methods of Analysis* / Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2008, 1224 p.

41. Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M. The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 2021, 10, 243. DOI: [10.3390/ijgi10040243](https://doi.org/10.3390/ijgi10040243)
42. Sumfleth K., Duttmann R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators // *Ecol Indic*, 2008, Vol. 8 (5). pp. 485–501. DOI: [10.1016/j.ecolind.2007.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.05.005)
43. Verhoeven D.T., Goldbohm R.A., van Poppel G., Verhagen H., van den Brandt P.A. Epidemiological studies on Brassica vegetables and cancer risk // *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev*, 1996, Vol. 5, pp. 733–748.

Received 24 September 2021

Accepted 02 December 2021

Published 12 December 2021

About the author:

Gopp Natalya Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gopp@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ В КОМПЛЕКСНОМ ПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ ПРЕДСАЛАИРЬЯ

© 2021 Н.А. Шапорина, Е.А. Сайб 

Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: sajb@issa-siberia.ru

Цель исследования: проследить закономерность распределения температуры почв по профилю в условиях склоновых территорий (Предсалаирья). Для достижения цели были поставлены следующие задачи: оценка температурного режима почв Предсалаирья, находящихся в сельскохозяйственном использовании; изучение закономерностей изменения температуры в течение суток и выявление возможной взаимосвязи с почвенно-физическими свойствами исследуемых участков; выявление зависимости формирования температурного поля от почвенных свойств.

Место и время проведения. Исследования проводились в лесостепной зоне, в пределах Буготакского мелкосопочника (55°03' с.ш.; 88°50' в.д.). Объектом исследования стал ряд почв выпуклого склона (длина 411 м) юго-восточной экспозиции. Было заложено пять полнопрофильных разрезов, недалеко от которых были установлены автономные температурные датчики (DS-1921G «Thermochron») через каждые 5 см до глубины 50 см, фиксирующие температуру каждые полчаса. Период наблюдения – с 1 июля по 15 августа 2016 года.

Основные результаты. Температурное поле пахотных почв склоновых поверхностей Предсалаирья является латерально неоднородным. Исследования показали, что пространственная изменчивость таких показателей, как влажность и плотность почв, в значительной степени влияет на теплопроводность почвенных горизонтов и является основной причиной неоднородности температурного поля. Рельеф, микрорельеф и экспозиция склона также играют важную роль в перераспределении влаги, неоднородности уплотнения и, соответственно, способствуют неравномерному прогреву верхних почвенных горизонтов. В наблюдениях как за суточным ходом температур в почвах при различных погодных условиях, так и за их сезонными колебаниями установлено, что расхождения в температурах сопряженных почв составляют 0,5–2 °С.

Заключение. Температурный режим почв является определяющим фактором функционирования агроэкосистем, от которого зависит интенсивность протекания большинства процессов в почвах. Исследования, основанные на количественных оценках интенсивности внутрипочвенных процессов при различной температуре, становятся всё более востребованы в самых разных областях, особенно при прогнозировании развития эрозионных процессов, или, например, при регулировании продукционного процесса сельскохозяйственных экосистем. А как показало данное исследование, температурный режим почв даже в пределах одного поля может значительно варьировать.

Ключевые слова: почвы, температура, влажность, плотность, микрорельеф, корреляция.

Цитирование: Шапорина Н.А., Сайб Е.А. Пространственное распределение температуры почв в комплексном почвенном покрове Предсалаирья // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 2. с146. doi: [10.31251/pos.v4i2.146](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.146)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в почвоведении активно развивается структурно-функциональное направление, в основе которого лежит рассмотрение различных аспектов функционирования почвы в тесной взаимосвязи с ее строением на различных уровнях организации, в том числе на уровне почвенного покрова (Гончаров, 2010).

Температура почвы является одним из ключевых факторов, определяющих функционирование агроэкологических систем. От температурного режима сильно зависит интенсивность протекающих в почве процессов, как механических и геохимических, так и биологических (Горышина, Макаревич, 1973; Бахлаева и др., 2002; Базыкина и др., 2007; Архангельская, 2012). Химические реакции ускоряются в 2–3 раза при повышении температуры на 10 °С (правило Вант–Гоффа). От температуры зависят такие процессы, как сорбция и десорбция; растворимость газов; соотношение твердой и жидкой фаз в почве; пептизация и коагуляция коллоидов. Не менее важную роль температура играет в питании растений: растворенные питательные вещества гораздо быстрее разносятся в теплых условиях, чем в холодных. Это

связано с тем, что повышение температуры в почве увеличивает скорость многих химических реакций, что напрямую влияет на доступность питательных веществ для растений (Христенко, Шатохина, 2002; Курганова, Типе, 2003; Parkin, Kaspar, 2003). Поэтому задача выявления закономерностей пространственного варьирования температуры почвы в масштабе сельскохозяйственного поля, количественной оценки этого варьирования и прогнозирования температурного режима почвенных разностей приобретает все большую актуальность, особенно с учетом перспектив развития точного земледелия (Кирюшин, 2010).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования приурочена к югу Западной Сибири и находится в зоне лесостепи. Объекты исследования расположены в пределах Буготакского мелкосопочника, расположенного на правом берегу Оби. Территория характеризуется достаточно сильной расчлененностью (до 2,2 км/км²), высота над уровнем моря достигает 350 м. Объектом исследования стал ряд почв выпуклого склона (длина 411 м) юго-восточной экспозиции. Уклон исследуемой территории меняется от 6° в нижней его части до 1° в верхней. Большую часть (до 60%) исследуемой территории склона составляют оподзоленные черноземы, расположенные в верхней части. Темно-серые лесные почвы занимают 39% территории и располагаются в основном в средней и нижней части данного склона. Менее 1% приходится на почвы лугового типа, которые располагаются в самой нижней части склона (Хмелев, Танасиенко, 2013). Полнопрофильные почвенные разрезы были заложены на пяти площадках (рис. 1). Начиная с поверхности до глубины 50 см через каждые 5 см устанавливались автономные температурные датчики (DS-1921G «Thermochron»), запрограммированные фиксировать температуру каждые полчаса. Датчики установлены 1 июля, сняты 15 августа.

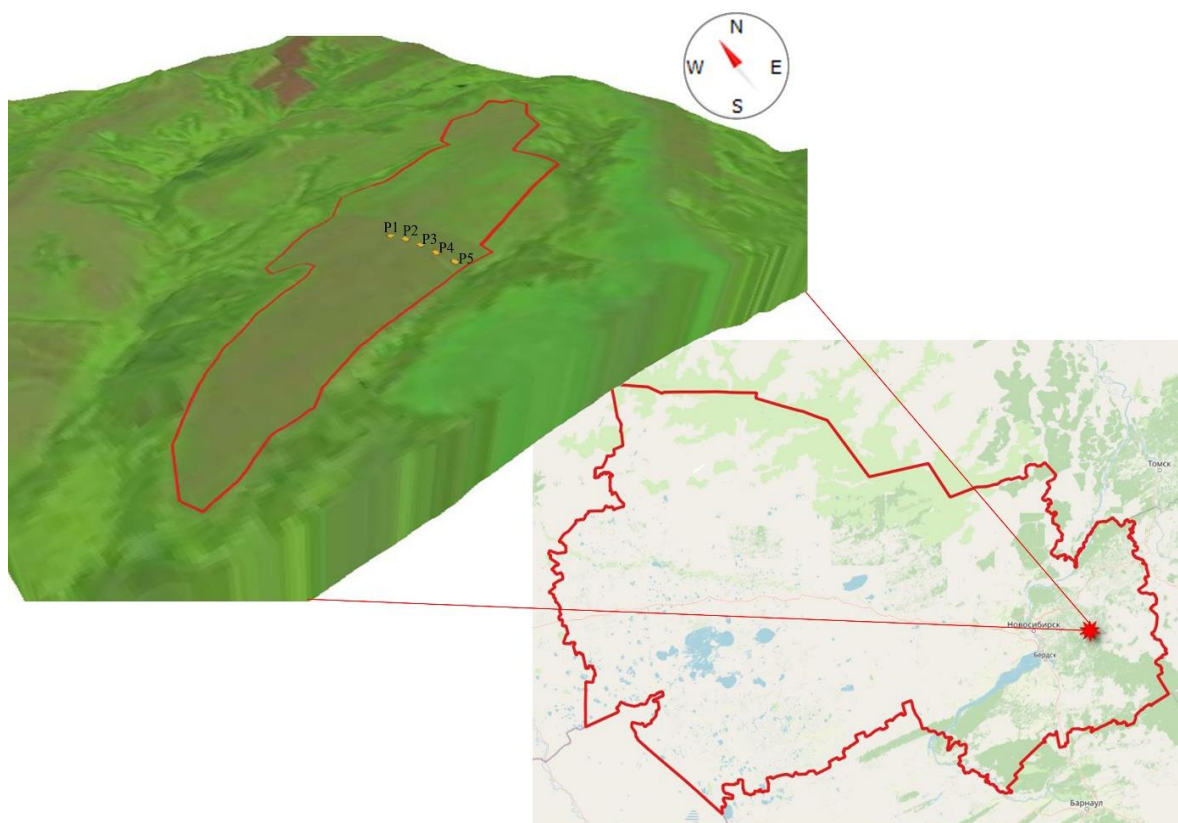


Рисунок 1. Район исследования и расположение разрезов на склоне.

Почвы: P1 – чернозем оподзоленный неэродированный; P2 – чернозем оподзоленный слабоэродированный; P3 – темно-серая лесная слабоэродированная; P4 – чернозем оподзоленный сильноэродированный; P5 – луговая средненамытая.

Образцы на влажность отбирали один раз в 10 дней буром через 10 см до глубины 50 см в трехкратной повторности, также в период с 1 июля по 15 августа. Почвенную влажность

определяли термостатно-весовым методом. В этот же период проводили мониторинг погодных условий (отслеживали температуру воздуха и осадки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основными почвенными параметрами, влияющими на формирование температурного режима, являются влагосодержание и плотность почв. Исходя из этого, изучено пространственное распределение этих почвенных свойств, характеризующих функционирование почвы. Результаты исследований показали неоднородность агрофизических свойств изучаемых почв. Так, например, наибольшей плотностью пахотного горизонта отличались неэродированный чернозем оподзоленный и луговая намытая почва. Но подпахотный горизонт последней отличался неравномерностью уплотнения от 1,21 г/см³ до 1,40 г/см³, что свидетельствует о своеобразии формирования профиля намытых почв (табл. 1). Для почвы средней части склона (темно-серая лесная слабоэродированная) характерна относительная рыхлость пахотного горизонта (1,15–1,21 г/см³) и равномерная плотность подпахотного (1,31–1,36 г/см³).

Таблица 1

Плотность деятельного слоя эродированных почв Предсалаирья, г/см³ (июль 2016 года)

Слой, см	Чернозем оподзоленный неэродированный	Чернозем оподзоленный слабоэродированный	Серая лесная слабоэродированная почва	Чернозем оподзоленный сильноэродированный	Луговая средненамытая почва
0–10	1,24	1,14	1,04	1,07	1,30
10–20	1,23	1,29	1,25	1,24	1,30
Среднее в пахотном горизонте	1,24	1,21	1,15	1,15	1,30
20–30	1,29	1,32	1,25	1,32	1,21
30–40	1,44	1,35	1,34	1,37	1,40
40–50	1,42	1,42	1,32	1,32	1,31
Среднее в подпахотном горизонте	1,38	1,36	1,31	1,34	1,31
Среднее в слое 0–50 см	1,31	1,28	1,23	1,25	1,30

Степень увлажнения почв в указанный период характеризовалась изменчивостью, обусловленной непостоянством погодных условий. В начале периода наблюдений 50-см слой практически у всех исследуемых типов почв был иссушен почти одинаково – до 62–64% от наименьшей влагоемкости (НВ), и только у луговой средненамытой почвы увлажнение было немного выше – около 70% НВ. Стоит заметить, что более высокий уровень увлажнения (> НВ) в профиле этой почвы отмечался в течение всего периода наблюдений.

Осадки выпадали неравномерно. Все 55 мм выпавших в первой декаде осадков остались в наблюдаемой толще всех почв. Наличие гравитационной влаги 10 июля было зафиксировано только в луговой средненамытой почве (20 мм). В период с 27 июля по 15 августа осадков практически не было, поэтому отмечался активный расход влаги во всех исследуемых почвах. К концу периода наблюдений черноземы содержали в среднем 70% влаги от НВ, темно-серая лесная и луговая средненамытая – 83 и 88% от НВ соответственно.

Установка регистраторов «Thermochron» позволила получить достаточно репрезентативную выборку данных по температуре для трех почв, наиболее контрастных по свойствам на уровне

типа: чернозема оподзоленного незэродированного, серой лесной слабоэродированной и луговой средненамытой (рис. 2).

Для всех типов почв фиксируются устойчивые тренды снижения температуры почвы за наблюдаемый период. Однако наклоны линий тренда отличаются. В серых лесных почвах и в луговых намытых наклон заметно больше, что означает более сильную тенденцию снижения температуры за один и тот же период времени. Тенденция сохраняется на глубине 20 см.

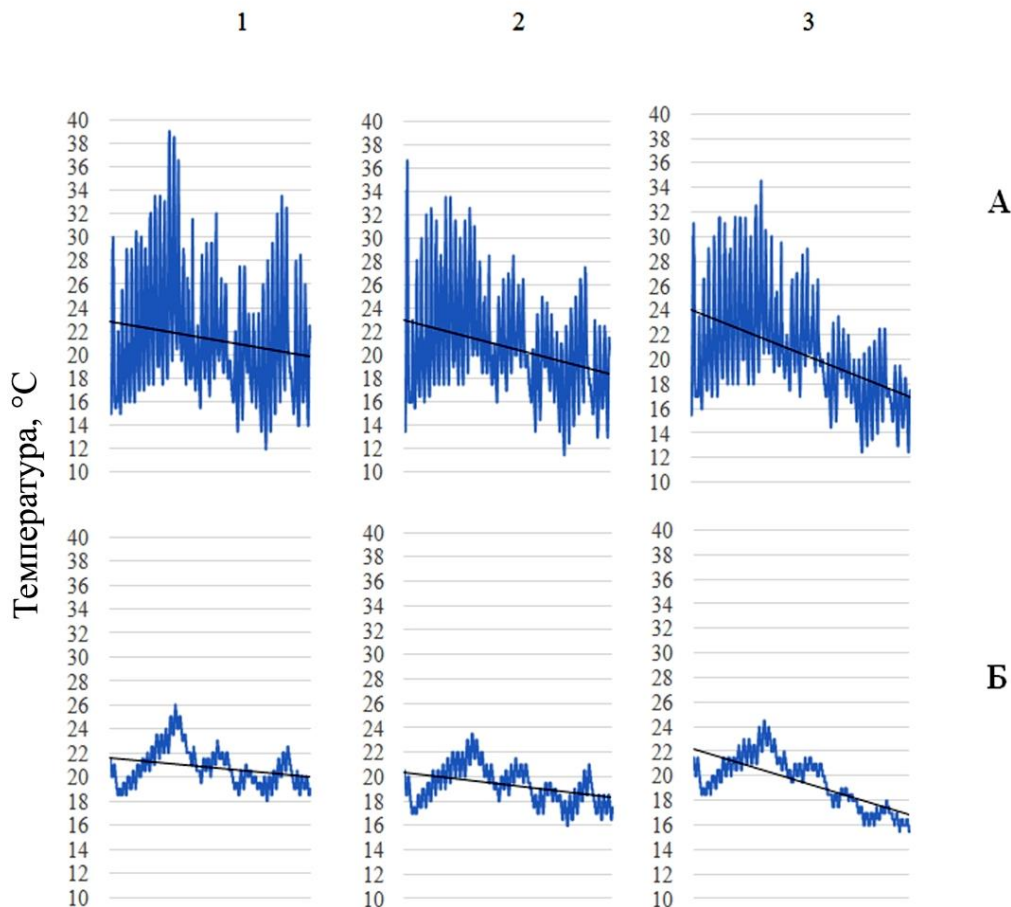


Рисунок 2. Динамика температуры в почвах Предсалаирья за весь цикл наблюдений.

А – на поверхности, Б – на глубине 20 см; почвы: 1 – чернозем оподзоленный незэродированный, 2 – серая лесная слабоэродированная, 3 – луговая средненамытая.

Статистическая обработка данных представлена в таблице 2. Средние температуры поверхности чернозема самые высокие – 21,4 °С, поверхность серой лесной почвы в среднем на 0,7 °С, луговой намытой – на 0,9 °С холоднее. Та же тенденция сохраняется и на глубинах 20 и 50 см. На глубине 50 см разница между черноземом и луговой намытой почвой достигает 1,3 °С. Размах колебаний между дневными и ночными температурами на поверхности также закономерно снижается от чернозема до луговой намытой почвы: 27, 25 и 22 °С соответственно, что связано с различным увлажнением поверхности. Однако на глубине 20 см закономерность нарушается: наибольший размах – в луговой намытой почве. Также в этой почве на глубине 20 см более высокое стандартное отклонение и коэффициент вариации. Причина может быть в особенностях сложения почвенного профиля, например, в неравномерном уплотнении, так как прослойки более низкой плотности обладают значительно меньшей теплопроводностью и способны замедлять прогрев нижележащих горизонтов. Кроме того, луговая средненамытая почва обладает мощной гумусовой толщей, и к тому же (в данном случае) расположена в нижней части склона, что способствует накоплению большего количества влаги и, соответственно, развитию более высокого травостоя, что, в свою очередь, также снижает возможность прогревания почвы. Черноземы оподзоленные, расположенные на плакоре, являются более плотными и равномерно сложенными, и, соответственно, они значительно теплее. Вариабельность температуры на

поверхности всех почв высокая (20–23%) и резко снижается (до 4,4–6,6%) на глубине 50 см, что свидетельствует о более ровном увлажнении профиля.

Таблица 2

Статистические показатели температурного режима почв Предсалаирья

Показатель	Чернозем оподзоленный неэродированный			Серая лесная слабоэродированная почва			Луговая средненамытая почва		
	Поверхность	20 см	50 см	Поверхность	20 см	50 см	Поверхность	20 см	50 см
Среднее	21,4	20,8	18,8	20,7	19,3	18,4	20,5	19,5	17,4
Максимум	39,0	26,0	21,0	36,5	23,5	20,0	34,5	24,5	19,5
Минимум	12,0	18,0	17,5	11,5	16,0	17,0	12,5	15,5	15,0
Размах	27,0	8,0	4,5	25,0	4,5	3,0	22,0	9,0	4,5
Стандартное отклонение	4,9	1,6	0,9	4,2	1,5	0,8	4,1	2,1	1,2
Дисперсия	24,0	2,5	0,7	17,6	2,3	0,6	16,0	4,4	1,3
Коэффициент вариации	22,9	7,6	4,6	20,3	7,9	4,4	20,0	10,8	6,6

Результаты исследования пространственного распределения средних температур представлены в виде топоизоплет (рис. 3), построенных с использованием интерполяции методом кригинга, которые наглядно демонстрируют характер распределения средних температур вдоль склона (характеристики склона см. на рис. 1). Современные возможности обработки пространственно-распределенных данных способны обеспечить количественное описание изменчивости почвенных характеристик, позволяют повысить точность оценки почвенных свойств при интерполяции данных и являются основой для планирования рационального отбора почвенных проб (Дмитриев, 1995; Сидорова, 2011).

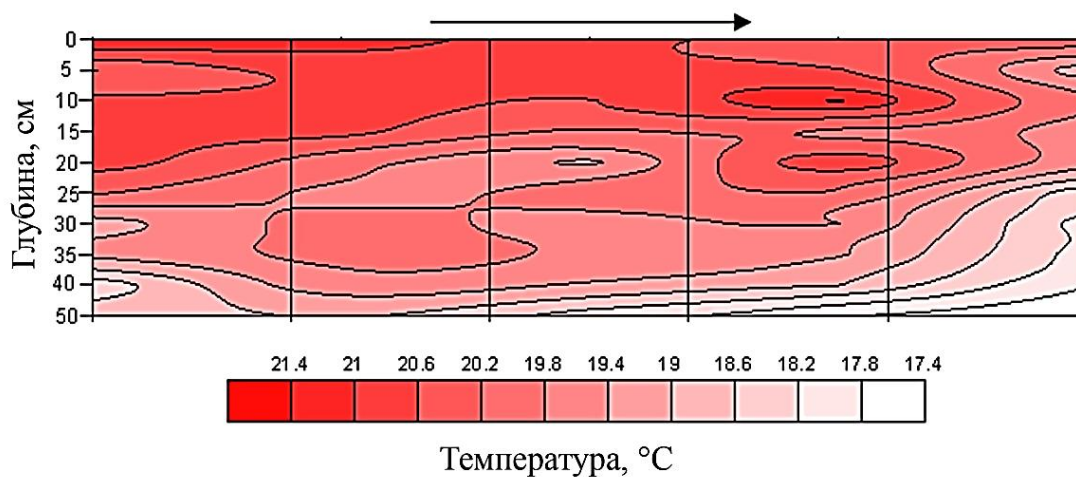


Рисунок 3. Распределение среднесуточных температур профиля глубиной 50 см по трансекте вдоль склона (→ – направление уклона).

Для наглядного представления различий суточного хода температур в почвах было выбрано два периода по 5 дней, различных по метеорологическим условиям. Первый, с 5 по 10 июля, был жарким и влажным; средняя температура воздуха составила 20,9 °С, максимальная – 28,1 °С, минимальная – 14,6 °С; выпадали обильные осадки. Вторым, с 5 по 10 августа, был теплым и сухим, со средней температурой воздуха 18,7 °С, без осадков. Ночная температура воздуха снижалась до 10 °С. Суточные колебания температуры были зафиксированы до глубины 35 см, на глубине 40 см они были едва заметны, на глубине 50 см не наблюдались (Шапорина и др., 2016).

Статистические показатели суточного хода температур в трех почвах, наиболее контрастных по влажностному режиму, представлены на рис. 4.

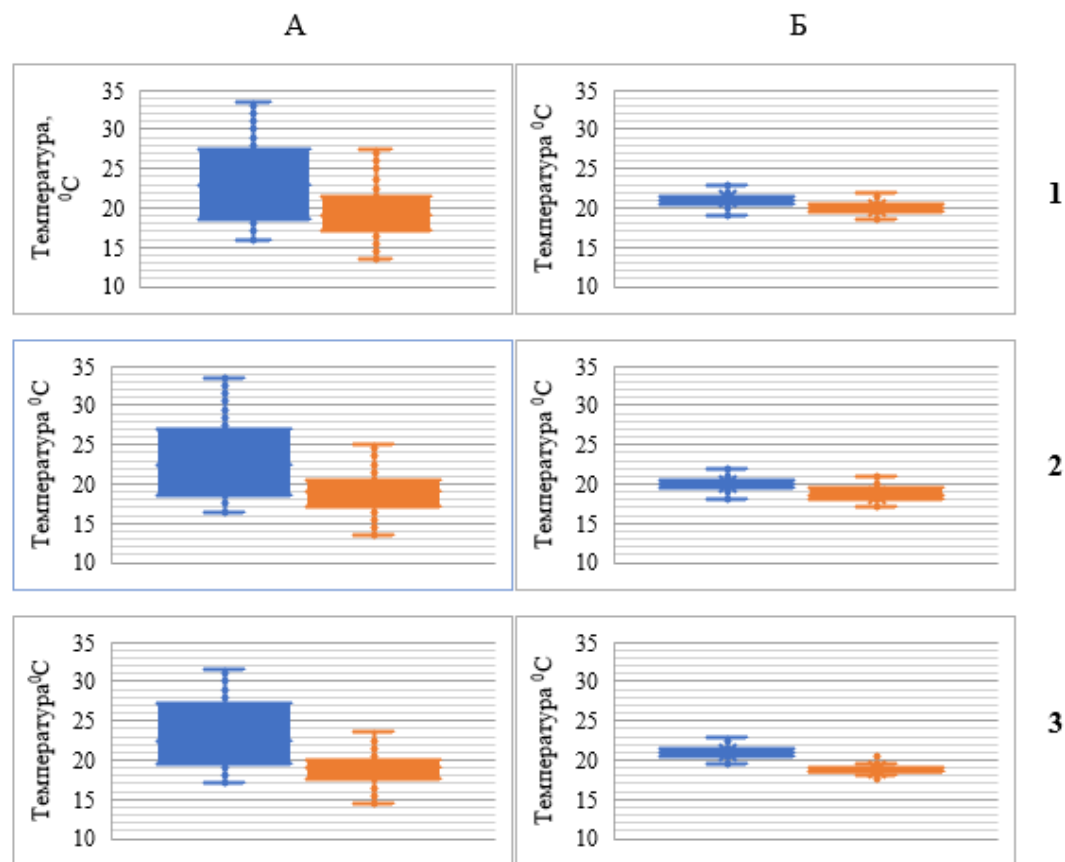


Рисунок 4. Статистические показатели варьирования значений суточного хода температуры почв на поверхности (А) и на глубине 20 см (Б).

Почва: 1 – чернозем оподзоленный неэродированный; 2 – темно-серая лесная слабоэродированная; 3 – луговая средненамытая (2016 год, июль – август).

Период наблюдений: ■ – с 5 по 10 июля; ■ – с 5 по 10 августа.

В обоих периодах наблюдений отмечались устойчивые тренды: в первом температура повышалась, а во втором снижалась. В первом размах колебаний дневных и ночных температур на поверхности почвы составил в среднем 15 °С, на глубине 20 см – 4 °С. Выпадение обильных осадков привело к значительному уменьшению теплового потока и снижению размаха колебаний до 11 °С. Во втором периоде наблюдалась совершенно другая картина: размах колебаний между дневными и ночными температурами не превышал 4–6 °С, при этом среднесуточные температуры снижались.

Почвенные разности можно четко разграничить по температурному режиму. Например, поверхностный слой чернозема оподзоленного оказался на 6 °С теплее, чем серой лесной слабоэродированной почвы, а луговой намытой и вовсе на 8 °С. На глубине 20 см серая лесная слабоэродированная почва на 2 °С, а луговая намытая на 4 °С холоднее чернозема оподзоленного неэродированного. Это можно объяснить тем, что в первом (влажном) периоде все эти почвы имеют относительно одинаковую степень увлажнения.

Отсутствие осадков во втором периоде расход влаги на транспирацию и испарение шел по-разному из-за приуроченности разных почв к различным элементам рельефа и микрорельефа (черноземы в основном занимают плакорные участки, серые лесные преимущественно тяготеют к микрозападинам, луговые намытые расположены в самой нижней части мезосклона). На перераспределение влаги по склону влияет не только направление и крутизна основного мезосклона, не меньшее влияние оказывает микрорельеф склоновой поверхности. Установлено, что в местах выделенных микрозападин повышенное увлажнение профиля наблюдается даже в условиях засушливых периодов. К подобным выводам пришел А. П. Сорокин (2009), в своей

работе он выявил корреляционные зависимости между почвенными свойствами и рельефом. Наши исследования в Предсалаирье показали, что коэффициент корреляции увлажненности почв с микрорельефом составляет 0,69. Ранее проведенные исследования в Приобье на черноземах также показали, что латеральная неоднородность пахотного горизонта по значениям плотности и влажности сказывается и на его температурных показателях. Анализ средних значений теплофизических коэффициентов генетических горизонтов для черноземов (за весь вегетационный период) показал, что более высокая влажность способствует меньшему дневному прогреву верхних горизонтов (примерно до 50 см), и, соответственно, получению более низких значений среднесуточных температур (Шапорина, Чичулин, 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что склоновая поверхность по почвенным свойствам является в значительной степени пространственно неоднородной. Крутизна склона, его протяженность, перепады высот и даже микрорельеф являются определяющими факторами в распределении влаги в почвах. Между влажностью поверхностного слоя 0–10 см и микрорельефом выявлены тесные корреляционные связи (коэффициент корреляции составил 0,69). На пространственную изменчивость плотности почвы основное влияние оказывают морфологические особенности строения профиля. Температурное поле пахотных почв, почвенного покрова склоновых поверхностей Предсалаирья в силу изменчивости влажности и плотности также является латерально неоднородным. Неоднородность температурного поля в почвенном покрове объясняется отличиями в физических свойствах почвенных горизонтов, в первую очередь их теплопроводности.

Наблюдение как за суточным ходом температур в почвах, так и за их сезонными колебаниями в разных погодных условиях показало, что расхождение температур в сопряженных почвах составляет 0,5–2 °С. В течение вегетационного периода почвы средней и нижней частей склона (серые лесные различной степени эродированности и луговые намывные почвы), в отличие от черноземов плакоров, характеризуются более низкой температурой, особенно в подпахотном горизонте.

Исследования, основанные на количественных оценках интенсивности протекания различных внутрпочвенных процессов при различной температуре, становятся всё более востребованы в самых разных областях, особенно при прогнозировании развития эрозионных процессов или, например, при регулировании продукционного процесса сельскохозяйственных экосистем.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН в рамках программы, финансируемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельская Т. А. *Температурный режим комплексного почвенного покрова*. М: Изд-во ГЕОС, 2012. 282 с.
2. Базыкина Г. С., Скворцова Е. Б., Тонконогов В. Д., Хохлов С. Ф. Влияние составляющих водного баланса и температурного режима на свойства постагрогенных дерново-подзолистых почв Подмосковья // *Почвоведение*. 2007. № 6. С. 685–697.
3. Бахлаева О. С., Никольский Ю. Н., Контрерас-Бенитес А., Ордас-Чанарро В. Оценка изменений свойств почв в зависимости от гидротермических условий на сельскохозяйственных угодьях (на примере Мексики) // *Почвоведение*. 2002. № 10. С. 1165–1170.
4. Гончаров В. М. *Агрофизическая характеристика почв в комплексном почвенном покрове*. Автореф. дис... д. б. н. М., 2010. 45 с.
5. Горышина Н.Г., Макаревич В.Н. Влияние термического режима почв на ход вегетации и продуктивность некоторых луговых сообществ // *Труды ГГО*. 1973. Вып. 306. С. 46–50.
6. Дмитриев Е. А. *Математическая статистика в почвоведении: учебник*. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
7. Кирюшин В. И. *Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов*. М.: Колос, 2010. 422 с.
8. Курганова И. Н., Тупе Р. Влияние процессов замерзания-оттаивания на дыхательную активность почв // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1095–1105.
9. Сидорова В. А. *Геостатистический анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия*. Автореф. дис...к. с. -х. н. Петрозаводск, 2011. 26 с.

10. Сорокин А. П. *Особенности пространственной variability почвенных свойств в ландшафтах дельты Волги*. Автореф. дис...к. б. н. Астрахань, 2009. 21 с.
11. Хмелев В. А., Танасиенко А. А. *Почвенные ресурсы Кемеровской области и пути их рационального использования*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 477 с.
12. Христенко С. И., Шатохина С. Ф. Влияние гидротермических факторов на микробный комплекс оподзоленного чернозема // *Почвоведение*. 2002. № 3. С. 335–339.
13. Шапорина Н. А., Чичулин А. В., Танасиенко А. А. Латеральная изменчивость агрофизических показателей и неоднородность гидротермического поля в почвенном покрове склоновых поверхностей Предсалаирья // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12–7. С. 1270–1275. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11027>
14. Шапорина Н. А., Чичулин А. В. Влияние микро рельефа на формирование гидротермического поля почвенного покрова водоразделов Приобского плато в орошаемых условиях // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 9. С. 130–134. <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11841>
15. Parkin T. V., Kaspar T. C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implications for estimating soil carbon loss // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. Vol. 67. P. 1763–1772.

Поступила в редакцию 06.07.2021

Принята 28.09.2021

Опубликована 14.10.2021

Сведения об авторах:

Шапорина Нина Аркадьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); shaporina@issa-siberia.ru

Сайб Екатерина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); sajb@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL TEMPERATURE IN THE COMPLEX SOIL COVER IN THE CIS-SALAIR REGION

© 2021 N. A. Shaporina, E.A. Sayb 

Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: redactor@mail.ru

The aim of the study was to find out the regularity of soil temperature distribution along soil profiles located on the slope territories (Cis-Salair region, Russia). To achieve this goal, the following tasks were set: assessment of the temperature regime of the soils of the Cis-Salair region, which are in agricultural use; studying the regularities of diurnal temperature changes and identifying a possible relationship with the soil physical properties of the studied areas; revealing the dependence of the temperature field formation on soil properties.

Location and time of the study. The study was conducted in the forest-steppe zone in the Bugotak Hills in the Novosibirsk region, Russia (55°03' N; 88°50' E). The object of the study was a series of soils on a convex hillslope (411 m long) of southeastern exposure. Five soil profile pits were dug, not far from which autonomous temperature sensors (DS-1921G “Thermochron”) were installed at every 5 cm to a depth of 50 cm, recording the temperature every 30 minutes. The observation period was from July 1 to August 15, 2016.

Main results. The temperature field of the arable soils on the Cis-Salair slopes was laterally inhomogeneous. Our study showed that the spatial variability of such indicators as soil moisture and density significantly affected the thermal conductivity of soil horizons, which was the main reason for the temperature field heterogeneity. The relief, microrelief and slope exposition also played an important role in the redistribution of moisture, heterogeneity of the density of soil cover, and, consequently, contributed to uneven heating of the upper soil horizons. The observation of both the diurnal variation of soil temperatures under various weather

conditions and their seasonal fluctuations found that the temperature differences in the adjacent soil series of the convex slope were 0.5–2 °C.

Conclusions. Soil temperature regime is a driving factor in the functioning of agroecosystems, determining the intensity of various soil processes. Studies based on the quantitative estimates of the intensity of subsurface processes at different temperatures are becoming increasingly in demand in various fields, especially in predicting erosion development, or, for example, in regulating the production process in agricultural ecosystems. Significant variation of soil temperature regime even within the one field should be taken into consideration for planning land use and adjusting local agricultural techniques.

Key words: soils; soil temperature; soil density; moisture content; microrelief; correlation.

How to cite: Shaporina N.A., Saib E.A. Spatial distribution of soil temperature in the complex soil cover in the Cis-Salair region // *The Journal of Soils and Environment*. 2021. 4(2). e146. doi:[10.31251/pos.v4i2.146](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.146) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Arkhangel'skaya T. A. *Temperature regime of the complex soil cover*. Moscow: GEOS publ., 2012. 282 p. (in Russian)
2. Bazykina G.S., Skvortsova E.B., Tonkonogov V.D., Khokhlov S.F. Water budget items and temperature regime of postagrogenic soddy-podzolic soils of Moscow region and their effect on the soil properties, *Eurasian Soil Science*. 2007, Vol. 40, No. 6. p. 616–627. (in English)
3. Bakhlaeva O. S., Nikolsky Yu. N., Kontreras-Benites A., Ordas-Chaparro V. Assessment of changes in soil properties depending on hydrothermal conditions on agricultural land (for example, Mexico), *Pochvovedenie*. 2002, No. 10. p. 1165–1170. (in Russian)
4. Goncharov V. M. *Agrophysical characteristics of soils in a complex soil cover*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. in Biology. Moscow, 2010, 45 p. (in Russian)
5. Goryshina N. G., Makarevich V. N. Influence of the thermal regime of soils on the course of vegetation and productivity of some meadow communities, *Trudy GGO*. 1973, Vol. 306. p. 46–50. (in Russian)
6. Dmitriev E.A. *Mathematical statistics in soil science: textbook*. Moscow, MSU publ., 1995, 320 p. (in Russian)
7. Kiryushin V. I. *Theory of adaptive landscape agriculture and design of agricultural landscapes*. Moscow: Kolos publ., 2011, 442 p. (in Russian)
8. Kurganova I. N., Tipe P. The effect of freezing-thawing processes on soil respiration activity, *Eurasian Soil Science*. 2003, Vol. 36, No. 9. p. 1095–1105. (in English)
9. Sidorova V. A. *Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of agricultural fields for precision farming*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Agr. Sci. Petrozavodsk, 2011, 26 p. (in Russian)
10. Sorokin A. P. *Features of the spatial variability of soil properties in the landscapes of the Volga delta*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. in Biology. Astrakhan, 2009, 21 p. (in Russian)
11. Khmelev V. A., Tanasienko A. A. *Soil resources of the Kemerovo region and the basics of its rational use*. Novosibirsk: SB RAS publ., 2013, 477 p. (in Russian)
12. Khristenko S. I., Shatohina S.F. Influence of hydrothermal factors on the microbial complex of podzolized chernozem, *Pochvovedenie*. 2002, No. 3. p. 335–339. (in Russian)
13. Shaporina N. A., Chichulin A. V., Tanasienko A. A. The lateral variability of agrophysical indicators and the heterogeneity of the hydrothermal field in soil cover of the slope surfaces in the Cis-Salair region, *International Journal of Applied and Basic Research*, 2016, No.12-7, p. 1270–1275. (in Russian) <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11027>
14. Shaporina N. A., Chichulin A. V. The influence of microrelief on the formation of hydrothermal fields of the soil cover of the watershed Priobskoye plateau in irrigated conditions, *International Journal of Applied and Basic Research*, 2017, No.9, p. 130–134. (in Russian) <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11841>
15. Parkin T.V., Kaspar T.C. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: implications for estimating soil carbon loss, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. Vol. 67. P. 1763–1772.

Received 06.07.2021

Accepted 28.09.2021

Published 14.10.2021

About the authors:

Shaporina Nina A. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); shaporina@issa-siberia.ru

Sayb Ekaterina A. – Junior Researcher in the Laboratory of Soil Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); sajb@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ В РАЙОНЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2021 А.В. Баженов , Е.Ю. Яковлев , С.В. Дружинин , С.А. Игловский 

Адрес: Федеральный центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН, ул. Набережная Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, 163000, Россия. E-mail: abv-2009@yandex.ru

Цель исследования. На основе новых данных провести анализ радиоактивности почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область).

Место и время проведения. Полевые исследования проведены летом 2018 года в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область).

Методология. Для выполнения поставленной задачи заложили 10 почвенных разрезов, из которых отобрали 69 почвенных образцов. В полевых условиях проведено описание морфологических свойств почв по генетическим горизонтам. В лабораторных условиях пробы почв высушивали в сушильном шкафу при температуре 105° С до постоянной массы. После взвешивания пробы помещали в сосуд Маринелли для измерения удельной активности изотопов (цезия (^{137}Cs), калия (^{40}K), радия (^{226}Ra) и тория (^{232}Th)) методом гамма-спектрометрии. Регистрацию гамма-излучений от счетного образца почв, а также обработку спектров проводили с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03. Калибровку гамма-спектрометра по энергии для контроля за сохранностью параметров установки проводили после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли объемом 1 литр. Минимальное время экспонирования счетного образца составляло 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью увеличивали.

Основные результаты. В результате полевых исследований установлено, что в данном районе преобладают характерные для северной тайги почвы из отдела альфегумусовых (подзолы, Podzols). Максимальная активность ^{137}Cs сосредоточена в подстильно-торфяном (от 11,4 до 71,8 Бк/кг) и гумусовом (от 26,7 до 105 Бк/кг) горизонтах. В подзолистом и альфегумусовом горизонтах происходит резкое снижение активности, достигающее в почвообразующей породе предельно измеряемых величин – от 2 до 3 Бк/кг. Общая тенденция накопления естественных изотопов ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных горизонтах в зависимости от типа и подтипа почвы выражена слабо. В ряде почвенных разрезов выявили увеличение активности естественных радионуклидов с глубиной: в основном это характерно для ^{40}K , где его активность изменялась от 82,6 до 652 Бк/кг. Активность ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных профилях изменялась в пределах от 2,4 до 47,2 Бк/кг и от 2,9 до 40,6 Бк/кг, соответственно. Это связано с тем, что торий прочно сорбируется почвой, поэтому миграция его по почвенному профилю выражена слабо. Он осаждается в почвах в виде гидроксидов. Большие обогащены радием суглинистые и глинистые почвы, а песчаные почвы, напротив, бедны этим радионуклидом. Количество радиоактивных элементов, содержащихся в почве, в значительной мере определяется концентрацией изотопов в подстилающих горных породах.

Заключение. Пики повышения концентрации в альфегумусовых горизонтах (BF, BFg) связаны с увеличением содержания глинистой фракции, гидроксидов Fe, Al, повышающих сорбционную способность почв. Подстильно-торфяной и гумусовый горизонт выступают в роли биогеохимического барьера, который удерживает радиоактивные элементы в почве на длительное время. Ввиду высокой фильтрационной способности подзолов нижележащие горизонты не являются надежными барьерами. ^{137}Cs и другие радиоизотопы могут связываться с гумусовыми веществами, оксидами и гидроксидами железа и алюминия, образовывать гумусово-железистые комплексы, осаждаться в почвенных новообразованиях, например, входить в минеральный состав ортитейнов. Более хаотичный характер распределения естественных радиоизотопов ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в большей степени связан с составом почвообразующих и подстилающих пород. Подвижность и накопление радионуклидов по профилю зависят от гранулометрического состава, содержания органического вещества, полуторных оксидов, минералогического состава, а также от температурного и водного режимов почв.

Ключевые слова: почва; радионуклиды; цезий; калий; радий; торий; содержание и распределение; месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова

Цитирование: Баженов А.В., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Игловский С.А. Радиоэкологические исследования почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область) // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 2. e137. doi: [10.31251/pos.v4i2.137](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.137)

ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивное загрязнение территории Европейского Севера России сформировалось в результате различных факторов: испытаний атомного оружия в атмосфере, в том числе на полигонах архипелага Новая Земля, аварий на атомных электростанциях, подземных ядерных взрывов в мирных целях, влияния объектов ядерной энергетики, пространственного перераспределения радиоактивных изотопов в результате естественных атмосферных, гидрологических и геологических процессов (Козодуб, 1983; Киселёв, 2013; Крячюнас, Шахова, 2013). Поскольку почва покрывает значительные площади, она является основным депонирующим радионуклиды компонентом окружающей среды, в котором сосредоточены основные запасы техногенных изотопов (Баженов, 2001; Егорова и др., 2012). Почва является важнейшим инерционным звеном биогеохимической системы, от скорости миграции радионуклидов в которой зависят темпы их распространения по всей цепочке (Ефремов, 2005). Из-за различий во фракционном составе ^{137}Cs , поступающего в ландшафты с глобальными, региональными или локальными выпадениями, особенности его миграции и аккумуляции в фоновых ландшафтах могут отличаться от закономерностей, выявленных на загрязненных территориях. Кроме того, радиальное и латеральное распределение цезия в фоновых ландшафтах сформировалось за более длительный период, чем тот, который характерен для территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС (Рачкова и др., 2010).

На территории исследования мощную антропогенную нагрузку на естественный северо-таежный ландшафт оказывают алмазодобывающие предприятия. Добыча полезных ископаемых не связана с возобновимыми биологическими ресурсами и представлена преимущественно локальными очагами, создающими интенсивную нагрузку на природную среду. Главным побочным следствием добычи минерального сырья и топлива является образование нарушенных земель в виде техногенных форм рельефа – карьеров, отвалов, хвостохранилищ, которые исключаются из оборота продуктивных земель и служат источниками загрязнения окружающей территории. В России общая площадь земель, нарушенных горнодобывающей промышленностью, составляет 1,3 млн га, или 0,07% всей территории страны. Однако в самих горнодобывающих районах доля таких земель может достигать нескольких процентов. Площадь нарушенных земель в таких районах непрерывно расширяется, в среднем на несколько процентов ежегодно. Их рекультивация сильно отстает от распространения и не всегда эффективна (Горячкин, 2010).

В окрестности заложения почвенных разрезов, в центре Беломорско-Кулойского плато, находятся два месторождения по добыче алмазов. Одно из них расположено в верховьях реки Золотица (месторождение им. М.В. Ломоносова), а другое – в верховьях реки Ручьи (месторождение им. В. Гриба). В этих районах вся коренная лесная растительность и почвы уничтожены, и на большой площади сформировался техногенный ландшафт, который не подлежит восстановлению. Разработка месторождения алмазов открытым способом может приводить к перераспределению естественных радионуклидов в почвах прилегающих к месторождению территорий.

Цель исследований – на основе новых данных провести анализ радиоактивности почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова, расположенного на территории Беломорско-Кулойского плато (Архангельская область).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспедиционные работы по изучению почвенных разрезов и отбору проб для определения содержания радионуклидов проводили в июне-июле 2018 г. сотрудниками лаборатории экологической радиологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН (г. Архангельск). В полевых условиях проводили описание морфологических свойств почв по генетическим горизонтам согласно классификации почв России (Классификация..., 2004). Координаты заложённых почвенных разрезов фиксировали GPS-навигатором (рис. 1, табл. 1). Беломорско-Кулойское плато расположено в 100–120 км

восточнее Архангельска, между реками Кулой и Пинега и Белым морем. Его площадь составляет около 25 тыс. км². Средняя высота плато около 100 м, максимальная – 218 м. В геолого-структурном отношении территория плато расположена на севере Русской плиты и представляет зону сочленения Балтийского щита и Мезенской синеклизы. Здесь распространены ландшафты холмисто-котловинных и возвышенных равнин, сложенные карбонатной валдайской мореной на основании из известняков, доломитов и гипсов. Вся территория Беломорско-Кулойского плато занята ландшафтами северной тайги. Преобладающими растительными сообществами являются ельники зеленомошные, в меньшей степени – долгомошные, сфагновые, болотно-травяные и разнотравные. Характерны также смешанные леса, сосняки, березняки и осинники (География ..., 1977). Почвы северо-таёжной подзоны Европейского Севера России обладают сильно кислой реакцией почвенного раствора, значения гидролитической кислотности снижаются с глубиной профиля. Для почв характерны наличие низкой емкости катионного обмена, ненасыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями, преобладание соединений магния над кальцием, низкое содержание гумуса – десятые доли процента.

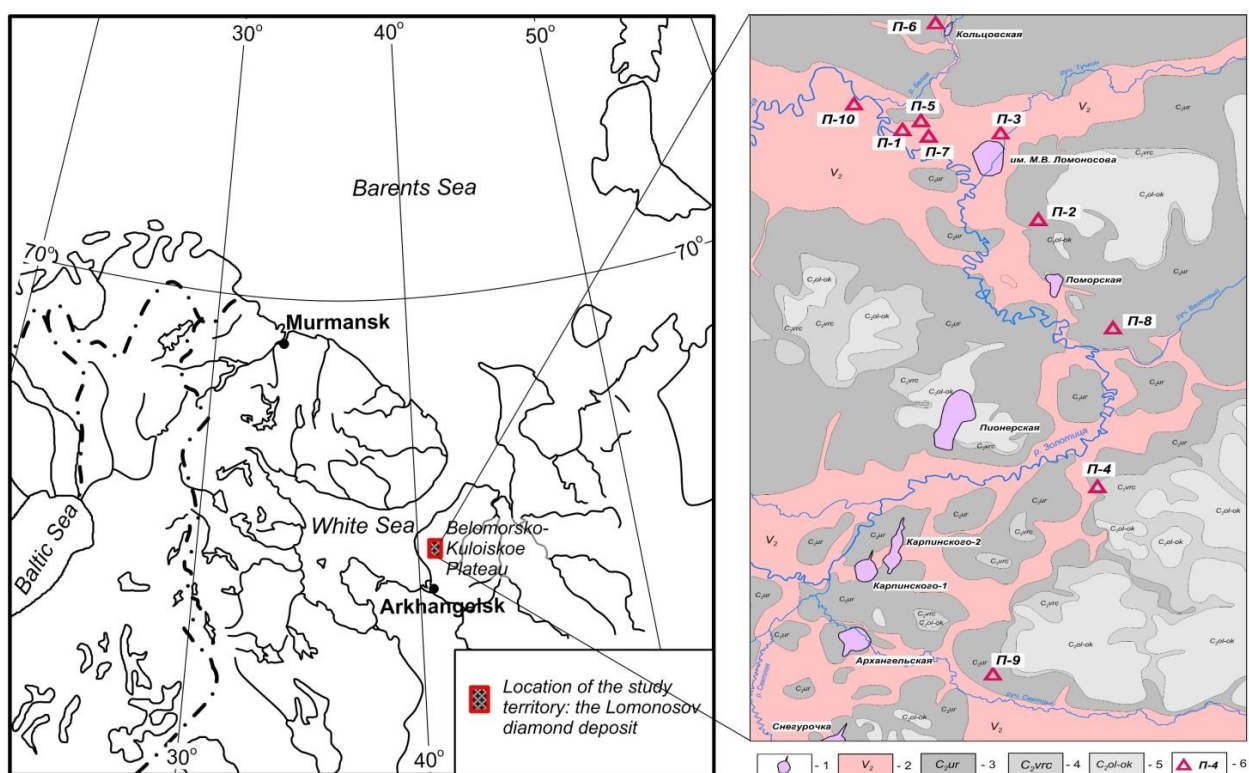


Рисунок 1. Положение Золотицкого участка Зимнебережного алмазонасного района на территории Беломорско-Кулойского плато: 1 – трубка взрыва; 2 – венд, верхний отдел (падунская свита – песчаники с прослоями алевролитов); 3–5 – каменноугольные отложения (средний отдел: 3 – урзугская свита – с редкими маломощными прослоями алевролитов, реже известняков и гравелитов); 4 – воереченская свита (пачка преимущественно зеленоцветных песчаников, алевролитов и глин с частыми прослоями долокретов); 5 – олмуго-окуневская свита (известняки и доломитизированные известняки с включениями кремней); 6 – точки заложения почвенных разрезов.

Из генетических почвенных горизонтов (до подстилающей почвообразующей породы) отобрали 69 проб, которые упаковали в пластиковые пакеты, маркировав соответствующим кодом. В лабораторных условиях пробы почв высушивали в сушильном шкафу при температуре 105° С до постоянной массы. После взвешивания пробы почв помещали в сосуд Маринелли для измерения удельной активности изотопов (цезия (¹³⁷Cs), калия (⁴⁰K), радия (²²⁶Ra) и тория (²³²Th)) методом гамма-спектрометрии. Регистрацию гамма-излучений от счетного образца почв, а также обработку спектров проводили с использованием программно-аппаратурного комплекса «Прогресс-гамма» ФВКМ.412131.002-03 (Методика..., 2016). Калибровку гамма-спектрометра по

энергии для контроля за сохранностью параметров установки проводили после каждого измерения с использованием комбинированного контрольного источника ОИСН-137-1 в сосуде Маринелли объемом 1 литр. Минимальное время экспонирования счетного образца составляло 3600 секунд. Однако в зависимости от активности пробы время экспонирования в отдельных образцах со слабой активностью увеличивали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В почвенном покрове преобладают подзолистые почвы на карбонатных моренах и подзолы (см. табл. 1), в меньшей степени развиты полугидроморфные и гидроморфные почвы. В виде небольших ареалов встречаются бурозёмы грубогумусированные, перегнойно-тёмногумусовые остаточно-карбонатные почвы, а также почвы на плотных гипсах.

Таблица 1

Морфологические и географические характеристики почв в районе исследований

№ разреза	Название почвы; место заложения почвенного разреза	Координаты	Индекс почвенного горизонта	Глубина залегания / мощность, см
1	2	3	4	5
П-1-18	Подзол иллювиально-железистый поверхностно-элювиальный; нижняя часть склона (крутизна 1–2°) в районе долины р. Золотица	N 65°22.206' E 41°02.555'	O	0–1/1
			AУ	1–18/17
			E	18–21/3
			BF1	21–46/25
			BF2	46–98/52
			BF C	98–148/50
П-2-18	Подзол иллювиально-железистый мелко-элювиальный песчаный на завалуненных моренных суглинках; отдельная вершина междуречья, прилегающего к долине р. Золотица	N 65°21.285' E 41°05.204'	O	0–1/1
			AУ	1–11/10
			E	11–20/9
			BF1	20–36/16
			BF2	36–50/14
			BF C	50–100/50
П-3-18	Аллювиальная почва; правый берег р. Тучкин, пойма, 7 м от русла (прирусловая терраса).	N 65°22.222' E 41°04.479'	O	0–1/1
			AУ	1–14/13
			C [~]	14–22/8
			C ^{g~}	22–43/21
			C ^{g[~]~}	43–55/32
			C [~]	55–63/8
			C [~]	63–88/25
П-4-18	Подзол глееватый иллювиально-железистый неглубоко элювиальный; склон крутизной 1–2°, 500 м от отстойника алмазоносной кимберлитовой трубки	N 65°18.994' E 41°06.636'	O	0–1/1
			AУ	1–10/9
			E	10–14/4
			BF1	14–46
			BF2g	46–65/19
			BF3g	65–88/23
П-5-18	Подзол иллювиально-железистый поверхностно-элювиальный; водораздел в долине р. Золотица, с двух сторон, окружен заболоченными территориями	N 65°22.272' E 41°02.903'	O	0–1/1
			AУ	1–6/5
			E	6–14/8
			BF1	14–32/18
			BF2	32–74/42
			BF C	74–113/39
			BF4	113–126/
			BF C	126–176/50

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
П-6-18	Подзол иллювиально-железистый песчаный на делювиальных супесчано-суглинистых слоистых отложениях; склон долины малой реки крутизной 3–4°, в широкой U-образной балке	N 65°23.489' E 41°03.301'	O	0–1/1
			AY	1–9/8
			E	9–16/7
			BF1	16–36/20
			BF2g	36–56/20
			BF3g	56–100/44
			BF4g	100–116/16
			BF5g	116–134/18
			BF C	134–144/10
П-7-18	Подзол иллювиально-железистый супесчаный, подстилаемый с глубины 90 см глиной; стенка карьера	N 65°22.185' E 41°03.137'	O	0–1/1
			AY	1–12/11
			E	12–20/8
			BF1	20–47/27
			BF2	47–60/13
			BF3	60–93/33
			BF4	93–108/15
			BF5	108–136/28
			BF C	185–220/35
П-8-18	Подзол иллювиально-железистый супесчаный, подстилаемый мореной глубже 102 см; стенка карьера	N 65°20.281' E 41°06.565'	O	0–1/1
			AY	1–3/2
			E	3–9/6
			BF1	9–32/23
			BF2	32–61/29
			BF3	61–76/15
			BF C	102–127/25
П-9-18	Подзол иллювиально-железистый супесчаный на доломитовых отложениях; небольшая блюдцевидная ложбина на склоне крутизной от 1 до 2° вблизи ручья Светлый	N 65°16.992' E 41°05.809'	O	0–1/1
			AY	1–6/5
			E	6–14/8
			BF1	14–30/6
			BF2	30–54/24
			BF3	54–60/6
			BF C	93–123/30
П-10-18	Подзол иллювиально-железистый языковатый супесчаный, с глубины 40 см подстилаемый слоистыми делювиальными суглинисто-песчаными отложениями	N 65°22.487' E 41°01.822'	O	0–1/1
			AY	1–8/7
			E	8–11/3
			BF1	11–40/29
			BF2	40–99/59
			BF3g	99–115/16
			BF C	115–149/24

Наиболее типичный профиль почвы исследуемой территории отображен на рисунке 2. Формирование почвы происходит под влиянием комплекса факторов: медленных процессов разложения органического вещества; накопления органики в верхних почвенных горизонтах (O, AY); высокой плотности альфегумусового горизонта; способности радионуклидов перемещаться по почвенному профилю с атмосферными осадками, грунтовыми водами и по корневой системе растительности. Особенность распределения ^{137}Cs по почвенному профилю обусловлена рядом факторов – глобальным воздушным переносом в результате атмосферных ядерных испытаний в мире, а также последствиями аварии на Чернобыльской АЭС (Баженов, 2001; Киселев, 2013).



Рисунок 2. Профиль подзола иллювиально-железистого в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова.

Вертикальное распределение активности радионуклидов по генетическим горизонтам почв исследуемого района показано в таблице 2 и на рисунке 3 (средние значения по всем разрезам). Максимальная активность ^{137}Cs сосредоточена в подстильно-торфяном (от 11,4 до 71,8 Бк/кг) и гумусовом горизонтах (от 26,7 до 105 Бк/кг). В подзолистом и альфегумусовом горизонтах активность резко снижается, достигая в почвообразующей породе предельно измеряемых величин – от 2 до 3 Бк/кг. Анализ значений удельной активности техногенного ^{137}Cs в целом для всех почвенных разрезов показывает, что увеличение его концентрации происходит в верхних горизонтах, а это свидетельствует о слабой вертикальной миграции вниз по профилю за период накопления. Особенность распределения изотопа ^{137}Cs по почвенному профилю обусловлена внешним воздействием на почву – атмосферными выпадениями и условиями их формирования.

Таблица 2

Удельная активность ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K в почвах района месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова

Номер разреза	Индекс почвенного горизонта	Удельная активность радиоактивных изотопов, Бк/кг			
		^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
1	2	3	4	5	6
П-1-18	О	71,8±10,3	–	–	–
	AY	26,7±5,5	9,5±5,9	–	–
	Е	5,6±1,5	3,9±1,7	–	346,9±74,0
	BF1	–	2,8±1,4	–	318,0±62,0
	BF2	–	–	6,6±2,5	394,4±79,0
	BF3	–	6,0±1,4	7,3±4,2	407,9±97,0
	BF C	–	7,4±4,2	13,8±4,7	303,2±77,9
П-2-18	О	21,4±13,3	–	–	–
	AY	63,3±9,5	23,1±7,2	–	–
	Е	3,2±1,0	11,2±2,2	3,5±2,5	193,0±49,0
	BF1	3,5±1,1	19,6±3,4	13,9±3,8	319,6±65,4
	BF2	1,0±0,8	–	7,1±2,5	363,4±73,0
	BF C	–	10,0±2,2	10,1±3,5	354,7±71,0

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
П-3-18	O	11,4±6,3	–	–	–
	AY	58,7±11,0	19,8±10,9	–	–
	C [~]	2,8±1,7	7,6±4,6	16,3±5,4	475,0±110,0
	C [~]	–	10,7±5,0	19,1±5,8	520,0±117,0
	Cg [~]	–	6,5±3,4	8,0±3,3	375,2±84,0
	Cg [~]	–	6,1±3,9	15,5±4,8	455,0±102,0
	C [~]	2,0±1,1	5,8±3,9	20,7±5,4	450,0±101,0
П-4-18	O	–	15,6±8,4	–	–
	AY	78,5±13,2	–	–	109,1±77,2
	E	2,9±1,1	4,1±1,8	4,7±3,4	193,3±45,6
	BF1	1,7±1,6	11,3±4,1	5,2±3,3	294,8±73,7
	BF2g	2,1±1,7	9,3±3,5	8,1±3,2	338,9±76,7
	BF3g	2,4±0,9	9,9±1,9	8,1±2,6	398,4±76,4
	BF C	1,6±1,2	47,2±9,6	7,6±5,1	229,0±77,0
П-5-18	O	21,6±6,6	–	–	–
	AY	62,2±11,1	–	–	86,9±71,7
	E	4,7±1,3	2,8±1,5	–	285,0±68,8
	BF1	1,1±0,9	2,4±1,4	3,8±2,3	320,1±74,1
	BF2	3,3±1,5	12,0±6,3	19,5±7,3	408,0±112,0
	BF3	2,4±1,0	6,4±3,3	10,0±3,6	254,4±64,4
	BF4	–	7,9±3,6	4,8±3,2	295,0±72,4
П-6-18	O	–	–	–	–
	AY	61,1±16,2	–	–	–
	E	3,5±2,4	47,1±8,3	5,5±3,4	134,6±48,7
	BF1	–	13,1±4,8	14,2±4,8	304,1±78,7
	BF2g	2,7±2,6	13,9±5,6	24,7±6,6	602,0±133,0
	BF3g	3,4±2,3	5,6±3,9	12,4±4,5	274,0±72,8
	BF4g	–	4,2±3,5	–	226,4±64,2
	BF5g	3,1±1,2	8,9±4,7	21,9±6,0	652,0±138,0
П-7-18	O	36,9±17,9	–	–	–
	AY	82,4±15,4	–	–	–
	E	–	–	40,6±26,2	–
	BF1	–	–	18,9±18,2	283,0±206,0
	BF2	–	3,5±2,8	2,9±2,6	364,7±80,6
	BF3	–	–	5,8±3,3	365,8±84,6
	BF4	1,0±0,9	5,7±3,3	8,5±3,5	310,8±74,3
	BF5	–	8,3±3,9	16,3±4,6	411,4±92,3
	BF6	2,6±2,3	10,6±4,6	21,0±5,5	572,0±122,0
	BF7	–	10,1±5,2	28,7±7,1	623,0±136,0
П-8-18	O	12,3±8,8	15,2±5,9	–	–
	AY	105,0±17,7	4,8±4,7	–	126,0±101,0
	E	–	5,4±3,3	5,0±3,1	289,7±71,2
	BF1	–	6,2±3,1	8,0±3,2	253,5±61,8
	BF2	2,0±1,1	9,6±4,1	13,1±4,3	337,7±81,2
	BF3	3,7±1,5	4,3±2,9	5,0±2,9	154,3±46,9
	BF4	–	8,0±3,9	8,8±3,9	248,3±67,0
	BF C	2,4±2,0	3,4±3,2	8,4±3,7	216,6±60,4

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
П-9-18	O	39,5±15,0	13,3±8,8	–	–
	AУ	102,1±17,5	–	–	–
	E	3,9±1,9	4,0±2,9	–	226,4±58,6
	BF1	–	5,1±2,8	3,0±2,5	258,6±62,2
	BF2	–	3,7±2,8	3,7±2,7	252,0±62,0
	BF3	7,9±2,9	7,3±6,1	8,4±6,4	417,0±119,0
	BF4	–	10,3±4,0	7,3±3,5	315,6±77,1
D	–	5,2±2,8	4,7±2,6	234,5±57,4	
П-10-18	O	78,5±13,2	4,8±3,4	–	62,0±38,3
	AУ	78,1±19,0	–	–	–
	E	1,7±1,6	3,8±2,9	–	306,0±72,0
	BF1	–	5,8±3,2	2,9±2,7	354,2±80,8
	BF2	–	5,6±3,0	4,3±2,8	114,5±39,1
	BF3g	1,2±0,6	7,5±3,2	9,3±3,2	272,9±64,5
	BF C	12,0±5,7	5,0±4,7	12,3±5,7	362,3±97,0

Примечание. Прочерк обозначает удельную активность ниже предела обнаружения.

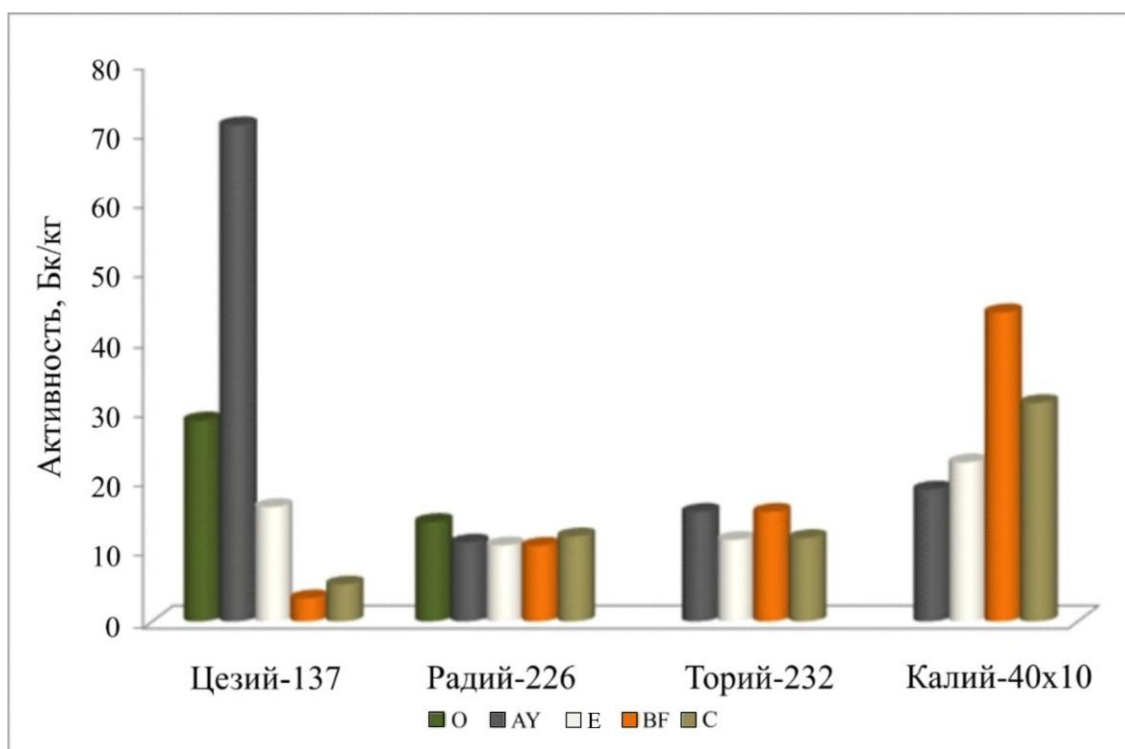


Рисунок 3. Распределение активности радионуклидов по генетическим горизонтам почв исследуемого района (средние значения по всем разрезам).

Общая тенденция накопления естественных изотопов ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных горизонтах в зависимости от типа и подтипа почвы выражена слабо (см. табл. 2). В ряде почвенных разрезов выявлено увеличение активности естественных радионуклидов с глубиной: в основном это характерно для ^{40}K , где его активность изменялась от 82,6 до 652 Бк/кг. Активность ^{226}Ra и ^{232}Th в почвенных профилях изменялась в пределах от 2,4 до 47,2 Бк/кг и от 2,9 до 40,6 Бк/кг, соответственно. Это связано с тем, что торий прочно сорбируется почвой, поэтому миграция его по почвенному профилю выражена слабо. Он осаждается в почвах в виде гидроксидов. Почвы, развитые на изверженных породах, характеризуются максимальными концентрациями тория в нижних горизонтах (Фесенко, Емлютина, 2020). Напротив, в карбонатных почвах он накапливается в верхних слоях (Чевычелов, Собакин, 2020). По нашим данным, больше обогащены радием суглинистые и глинистые почвы, а песчаные почвы бедны

этим радионуклидом. В целом же количество радиоактивных элементов, содержащихся в почве, в значительной мере определяется концентрацией изотопов в подстилающих горных породах.

ВЫВОДЫ

Получены новые данные по радиоактивности почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова, расположенного на территории Беломорско-Кулойского плато (Архангельская область). Максимальные содержания ^{137}Cs выявлены в подстильно-торфяном и гумусовом горизонтах.

Установлено, что верхние горизонты почвы выступают в роли биогеохимического барьера, который удерживает ^{137}Cs . Однако ввиду высокой фильтрационной способности подзолов нижележащие горизонты – подзолистый и альфегумусовый – не являются надежными барьерами, и некоторое количество ^{137}Cs может проникать до подстилающей почвообразующей породы.

Установлено, что распределение естественных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th имеет хаотичный характер и в большей степени связано с составом почвообразующих пород. Подвижность радионуклидов и их накопление по профилю почвы зависят от гранулометрического состава, содержания органического вещества, полуторных оксидов, минералогического состава, а также от температурного и водного режимов почв.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Экспедиционные исследования выполнены по теме государственного задания «Комплексные изотопно-геохимические исследования качества природной среды и идентификация процессов её трансформации на приморских территориях Европейского Севера в современности и в прошлом» (№ 0409-2019-0037 рег. номер НИОКТР АААА-А19-119011890018-3).

Аналитические и лабораторные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-05-60151, № 20-35-70060, а также гранта Президента РФ № МК-1919.2020.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов А.В. *Цезий-137 в почвах Архангельской области*. Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. М.: Ин-т геоэкологии РАН, 2001. 23 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002644583>
2. *География Архангельской области* / Под ред. Г.И. Горбовой, В.Ф. Изотова. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1977. 94 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007719998>
3. Горячкин С.В. *Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция)*. М.: ГЕОС, 2010. 421 с.
4. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Особенности миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва-растение // *Вестник ОГУ*. 2005. № 12. С. 42–46. <http://vestnik.osu.ru/doc/1033/article/2473/lang/0>
5. Киселев Г.П., Баженов А.В., Киселева И.М. Радиоактивные изотопы в почвах Архангельской промышленной агломерации // *Вестник Северного (Арктического) Федерального университета. Серия Естественные науки*. 2013. № 4. С. 12–20. https://vestnik.narfu.ru/archive/?ELEMENT_ID=147276
6. Козодуб Г.М., Таскаев А.И. *Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986-2001 гг.)*. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2002. 272 с.
7. *Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс»*. Москва: ООО НТЦ «Амплитуда», 2016. 12 с.
8. *Классификация почв и диагностика почв России*. Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Егорова И.А., Кислицина Ю.В., Пузанов А.В. Радионуклиды в почвах Северо-Западного Алтая // *География и природные ресурсы*. 2012. № 3. С. 31–35.
10. Крючюнас В.В., Шахова Е.В. Основные закономерности миграции ^{232}Th и ^{226}Ra в почвах города Архангельска // *Экология человека*. 2013. № 8. С. 23–27.
11. Рачкова Н.Г., Шуктумова И.И., Таскаев А.И. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // *Почвоведение*. 2010. № 6. С. 698–705.
12. Фесенко С.В., Емлютина Е.С. Концентрация тория в природных средах: обзор мировых данных // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60. № 6. С. 635–648. DOI: [10.31857/S0869803120050033](https://doi.org/10.31857/S0869803120050033)
13. Чевычелов А.П., Собакин П.И. Содержание и распределение естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в мерзлотных почвах центральной Якутии // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2020. Т. 13. № 1. С. 109–123. DOI: [10.17516/1997-1389-0315](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0315)

Поступила в редакцию 17.05.2021

Принята 05.11.2021

Опубликована 09.11.2021

Сведения об авторах:

Баженов Александр Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Российской академии наук (Архангельск, Россия); abv-2009@yandex.ru

Яковлев Евгений Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Российской академии наук (Архангельск, Россия); yakov24lev99@mail.ru

Дружинин Сергей Валерьевич – научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Российской академии наук (Архангельск, Россия); druzhininserg@yandex.ru

Игловский Станислав Анатольевич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Российской академии наук (Архангельск, Россия); iglovskys@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**SOIL RADIOECOLOGICAL STUDY IN THE LOMONOSOV DIAMOND MINING AREA
(ARKHANGELSK REGION, RUSSIA)**

© 2021 A.V. Bazhenov , E.Yu. Yakovlev , S.V. Druzhinin , S.A. Iglovsky 

Affiliation: N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (FECIAR UrB RAS), Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk 163000, Russia.

E-mail: abv-2009@yandex.ru

The aim of the study was to obtain new data and on their basis to analyze soil radioactivity in the Lomonosov diamond mining area (Arkhangelsk region, Russia).

Location and time of the study: Field studies were carried out in the summer of 2018 in the Lomonosov diamond mining area (Arkhangelsk region, Russia).

Methodology: To accomplish the task, 10 soil profile pits were cut, and 69 soil samples were taken from them. In the field, a description of soil morphology was carried out. Under laboratory conditions, the samples were dried at 105° C to constant mass. After weighing, the soil samples were placed in a Marinelli vessel to measure the specific activity of isotopes (cesium (¹³⁷Cs), potassium (⁴⁰K), radium (²²⁶Ra) and thorium (²³²Th)) by gamma spectrometry. Registration of gamma radiation from a counting soil sample, as well as processing of spectra was carried out using the Progress-gamma software and hardware complex FVKM.412131.002-03. The energy calibration of the gamma spectrometer to control the safety of the setup parameters was carried out after each measurement using a combined control source OISN-137-1 in a Marinelli vessel. The minimum exposure time of the counting sample was 3600 seconds. However, depending on the activity of the sample, the exposure time in individual samples with weak activity increased.

Main results: As a result of field studies, it was found that Podzols, characteristic of the northern taiga, prevail in this area. The maximum activity of ¹³⁷Cs was concentrated in the litter-peat (11.4–71.8 Bq/kg) and the humus horizon (26.7–105 Bq/kg). In the podzolic and Al-Fe-humus horizons there was a sharp decrease in the activity, reaching the lowest measured values in the parent rock (2–3 Bq/kg). The general tendency for the accumulation of natural isotopes ⁴⁰K, ²²⁶Ra, and ²³²Th in the soil horizons was found to be weakly related to soil type or subtype. In some soil pits an increase in the natural radionuclides with depth was observed, being mostly the characteristic of ⁴⁰K as its activity changed downwards from 82.6 to 652 Bq/kg. The ²²⁶Ra

and ^{232}Th activities in the soil profiles varied from 2.4 to 47.2 Bq/kg and from 2.9 to 40.6 Bq/kg, respectively. This is due to the fact that thorium is strongly sorbed by soil; therefore, its migration along the soil profile is poorly expressed, and the element is deposited in soils in the form of hydroxides. Loamy and clayey soils, were shown to be more enriched in radium, whereas sandy soils were poor in this element. The amount of radioactive elements, contained in a soil, is largely determined by the concentration of their isotopes in the underlying rocks.

Conclusion: The peaks of increasing concentration in the Al-Fe-humus horizons (BF, BFg) were associated with an increase in the content of the clay fraction, Fe, Al hydroxides, which increase the sorption capacity of soils. The litter-peat and the humus horizon act as a biogeochemical barrier that retains radioactive elements in the soil for a long time. Due to the high filtration capacity of podzols, the underlying horizons are not reliable barriers. ^{137}Cs and other radioisotopes can bind with humic substances, oxides and hydroxides of iron and aluminum, form humus-ferruginous complexes, precipitate as new soil formations, e.g. become part of the mineral composition of hard pans. The distribution of natural radioisotopes ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th was found to be more chaotic and more related to the composition of the constituent rocks. The mobility and accumulation of radionuclides along soil profiles depends on the particle size distribution, the content of organic matter, sesquioxides, mineralogical composition, as well as on the temperature and water regime.

Key words: soil, radionuclides; cesium; potassium; radium; thorium; diamond mining

How to cite: Bazhenov A.V., Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V., Iglovsky S.A. Soil radioecological study in the Lomonosov diamond mining area (Arkhangelsk region, Russia) // *The Journal of Soils and Environment*. 2021. 4(2). e137. doi: [10.31251/pos.v4i2.137](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.137) (in Russian with an English abstract).

REFERENCES

1. Bazhenov A.V. *Cesium-137 in the soils of the Arkhangelsk region*. Abstract of Dissertation ... Cand. geological miner. sciences. Moscow: Institute of Geoecology RAS, 2001. 23 p. (in Russian) <https://search.rsl.ru/ru/record/01002644583>
2. *Geography of the Arkhangelsk Region* / Ed. G.I. Gorbova, V.F. Izotova. Arkhangelsk: North-West. book publishing house, 1983. 110 p. (in Russian) <https://search.rsl.ru/ru/record/01007719998>
3. Goryachkin S.V. *Soil cover of the North (structure, genesis, ecology, evolution)*. Moscow: GEOS, 2010. 421 p. (in Russian)
4. Efremov I.V., Rakhimova N.N., Yanchuk E.L. Features of migration of cesium-137 and strontium-90 radionuclides in the soil-plant system, *Vestnik OSU*, 2005, No. 12, p. 42–46. (in Russian) <http://vestnik.osu.ru/doc/1033/article/2473/lang/0>
5. Kiselev G.P., Bazhenov A.V., Kiseleva I.M. Radioactive isotopes in the soils of the Arkhangelsk industrial agglomeration, *Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series Natural Sciences*, 2013, No. 4, p. 12–20. (in Russian) https://vestnik.narfu.ru/archive/?ELEMENT_ID=147276
6. Kozodub G.M., Taskaev A.I. *Radiobiological studies of conifers in the area of the Chernobyl disaster (1986–2001)*. Moscow: CPC «Design. Information. Cartography», 2002. 272 p. (in Russian)
7. *Methods for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma spectrometer with Progress software*. Moscow: LLC STC «Amplitude», 2016. 12 p. (in Russian)
8. *Soil classification of Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova*. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)
9. Egorova I.A., Kislitsina Yu.V., Puzanov A.V. Radionuclides in the soils of Northwestern Altai, *Geography and natural resources*, 2012, No. 3, p. 31–35. (in Russian)
10. Kriauciunas V.V., Shakhova E.V. Main regularities of ^{232}Th and ^{226}Ra migration in the soils of the city of Arkhangelsk, *Human Ecology*, 2013, No. 8, p. 23–27. (in Russian)
11. Rachkova N.G., Shuktumova I.I., Taskaev A.I. State of natural radionuclides of uranium, radium and thorium in soils (review), *Pochvovedenie*, 2010, No. 6, p. 698–705. (in Russian)
12. Fesenko S.V., Emlyutina E.S. Thorium Concentration in Natural Environments: Review of World Data, *Radiation Biology. Radioecology*, 2020, Vol. 60, No. 6, p. 635–648. (in Russian) DOI: [10.31857/S0869803120050033](https://doi.org/10.31857/S0869803120050033)
13. Chevychelov A.P., Sobakin P.I. Content and distribution of natural radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K in permafrost soils of central Yakutia, *Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology*, 2020, Vol. 13, No. 1, p. 109–123. (in Russian) DOI: [10.17516/1997-1389-0315](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0315)

Received 17 May 2021

Accepted 05 November 2021

Published 09 November 2021

About the author(s):

Bazhenov Alexander Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Environmental Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; abv-2009@yandex.ru

Yakovlev Evgeny Yurievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; yakov24lev99@mail.ru

Druzhinin Sergey Valerievich – Researcher, Laboratory of Ecological Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; druzhininserg@yandex.ru

Iglovsky Stanislav Anatolyevich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Environmental Radiology, Institute of Geodynamics and Geology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Arkhangelsk, Russia; iglovskys@mail.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



RAINFALL PATTERNS ASSOCIATED WITH RUNOFF AND EROSION LEVELS IN WEST-SIBERIAN CHERNOZEMS

© 2021 A.A. Tanasienko ¹, A.S. Chumbaev ¹, O.P. Yakutina ¹,
G. Almendros ², B.M. Klenov ¹

Affiliations: ¹Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: tanasienko@ngs.ru, chumbaev@issa-siberia.ru, oyakutina@issa-siberia.ru, klenov@issa-siberia.ru

²Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), Serrano 115 B, E-28006 Madrid, Spain; E-mail: humus@mncn.csic.es

The aim of the study was to identify 1) the main regularities of surface runoff formation due to downpours and 2) the extent of erosion process on arable chernozems in areas with dissected relief and sharply continental climate. The influence of rainfall patterns and soil physical factors on soil erosion was studied in three large geomorphological regions in the South-East of West Siberia. Field observations were carried out during 1968–1979 in the Kuznetsk Depression and in 1984–1986 in the Near-Ob areas, and from 1995 until present in the Near-Salair area. The data of meteorological stations were analyzed for rainfall patterns in the same years, including inter-year variability and downpour recordings. Summer precipitation and its intensity were measured by using hydrograph unit. Water infiltration in the field was studied by the method of small flooded areas (Nesterov's method), when square or round frames with an area of 2500 (external) and 625 cm² (internal) were installed on the soil surface. To simplify and automate water supply, the PVN-00 device was used, consisting of two hermetically sealed tanks, two cylindrical frames of different diameters and a tripod. The influence of rainfall patterns and soil physical factors on the processes of soil erosion was studied. As regards climatic factors the data of meteorological stations were analyzed for historical rainfall patterns, including interannual variability and downpour recordings. Experimental data of water infiltration, runoff and soil loss were discussed for the main soils units: Greyzemic Phaeozems (Siltic), Luvic Chernozems (Siltic) and Haplic Chernozems (Siltic) with variable content of soil organic matter and erosion levels. The studied regions were characterized by the prevalence of precipitation during the warm growing season and by sporadic or cyclical precipitation patterns. Heavy rains were found to cause significant damage to agricultural land only locally, during early spring, when the soil is not protected by vegetation. The greatest erosion hazard is represented by meltwater, not only by its total amount, but also by the snow thawing rate. The significant decrease in the infiltration rates with extensive farming is the main factor of degradation of the most fertile soils in West Siberia. Soil vulnerability to erosion in the studied area was shown to decrease in the range: Kuznetsk Depression > Near-Salair > Near-Ob (no storm damage).

Key words: dissected forest-steppe; physical constraints; rainfall intensity; water infiltration; soil loss; surface runoff; Greyzemic Phaeozem; Luvic Chernozem; Haplic Chernozem; West Siberia.

How to cite: Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Almendros G., Klenov B.M. Rainfall patterns associated with runoff and erosion levels in West-Siberian Chernozems // *The Journal of Soils and Environment*. 2021. 4(2). e145. doi: [10.31251/pos.v4i2.145](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145)

INTRODUCTION

Erosion is one of the main factors leading to the destruction of soil cover on the planet (Lal 2001; Daniel et al. 2015; Owens 2020). The accumulation and analysis of climatic and soil data describing erosion processes over long observation periods serve as good material for studying the behavior of erosional landscapes and making forecasts of erosion. In the European part of Russia, according to the generalized analysis of soil and climatic data for the period from 1963 to 2015, the decrease in annual amount of erosion losses was due to a decrease in surface runoff during the spring snowmelt. This was due to an increase in air and soil temperatures during the winter period. At the same time, summer precipitation amount increased which led to an increase in soil erosion losses (Golosoov et al., 2018). West Siberia has specific soil and climatic condition, therefore, its territory is classified as vulnerable in terms of erosion.

Most of the arable land of dissected forest steppe of West Siberia consists of chernozems which occupy almost 20·10⁶ ha, including 13·10⁶ ha of arable lands (Khmelev, Tanasienko, 2009a) that yield high-quality grain owing to its high initial fertility. The population of West Siberia increased essentially

in the 20th century with an accompanying increase in the agriculturally used area. By that time, the most fertile lands in West Siberia (chernozems) on its rather flat territory were completely developed. The further development of virgin and fallow lands was performed on sloping surfaces which are prone to soil erosion; the slope of these surfaces is sometimes greater than 5% and even 15%. The surface runoff is well known to occur already on slopes as steep as 2–4%; consequently, at present in West Siberia a total area of about $7 \cdot 10^6$ ha is exposed to different levels of erosion.

The erosion rates in West Siberia depend closely on the strong dissection of the relief, heavy snowfalls in winter and rapid snow melting, which is accompanied by the formation of an ice sheet that prevents the filtration of snow melted water into the soil profile. In consequence, during the thaw period, runoff on the slopes can affect as much as *ca.* 60% of the arable land in the region. Heavy rainfall during the summer period also significantly damages the soil cover on arable slopes. Due to the fact that profile thickness of Siberian chernozems is less than in soils of the European Russia, the soils are extremely exposed to erosion (Tanasienko, 2003).

Under these conditions and in combination with local geomorphological constraints, the analysis of extreme events has long been a major topic in environmental change research (Hudson, Inbar, 2012). Thus, this work aims to identify i) the main regularities of the surface runoff formation due to downpours and ii) the extent of erosion processes on arable chernozems under conditions of dissected relief and sharply continental climate.

MATERIALS AND METHODS

The study area is located in the basin of the upper reaches of the Ob River and is represented by structural-denudation and accumulative plains of the West Siberian lowland, denudation plains, low mountains and middle mountains of the Altai-Sayan mountain region (Orlov, 1983). The studies were carried out both in the left-bank part (Figure): the Near-Ob plateau (Preobye), and in the right-bank part, the Near-Salair hilly plain (Predsalairye) (within the limits of the Novosibirsk region) and the Kuznetsk Depression (within the limits of the Kemerovo Region). The main physical and geographical features of these geomorphological regions are given below.

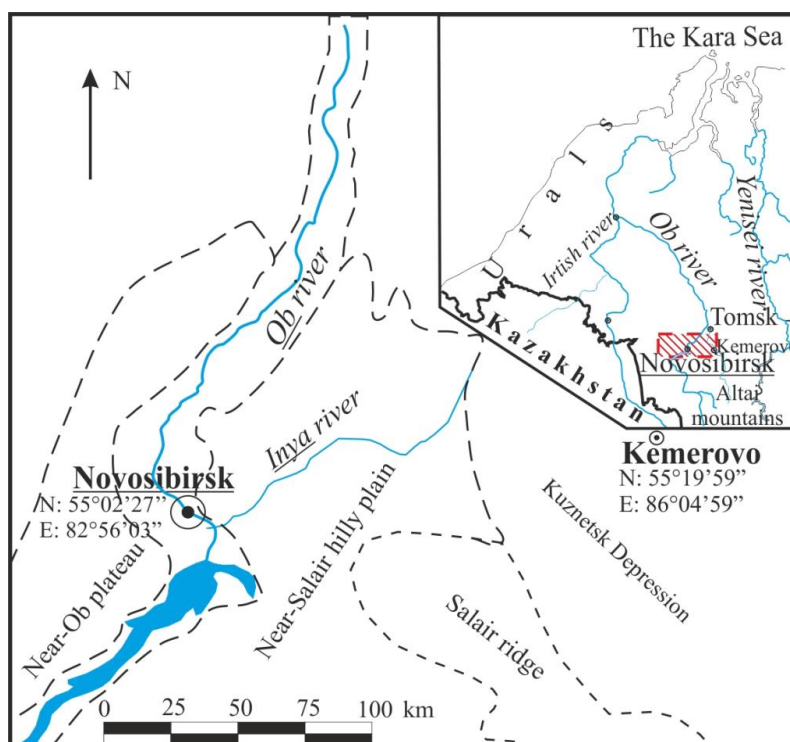


Figure. Map of the main orographic units of the South-eastern part of West Siberia, Russia (dashed lines indicate boundaries between the main units).

Near-Salair. This region refers to tabular and undulating strongly dissected flat plain with absolute heights of 200–300 m a.s.l.; in general, this territory slopes towards West-Siberian plain. Watershed spaces in this area occupy about 1/5 of the territory. The slopes are as steep as 5–15%, complicated and

rather long (600–800 m). The density of horizontal dissection ranges within the limits of $1.0\text{--}1.2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, whereas vertical dissection averages 75–100 m.

This region shows widely spread man-made degraded forest steppe landscapes under conditions in which soil cover is characterized by low complexity. Basic soil background consists of leached and podzolized chernozems. Soil-forming rocks of chernozems are loess-like loams. The following features are typical for such rocks: pale-yellow color, calcareousness, columnar structure and high porosity. Loess-like loams are homogenous in terms of their granulometric composition and most of them derive from heavy-textured rocks (Khmelev, Tanasienko, 2009a).

At present due to the general socioeconomic development of the land, the territory of Near-Salair with highly sustainable sloping soils has turned into zones of intensive denudation. In consequence, up to 1/5 part of the arable lands (i.e., about $200\cdot 10^3$ ha of $950\cdot 10^3$ ha) are eroded to weak and medium extents. Therefore, as regards erosion, this region is classified as being at the medium potential risk.

Near-Ob. This region is located in the transition belt from forest steppe to steppe. As regards soil cover, this area includes mainly leached chernozems which are medium in thickness, humus content and loamy fraction content. Total area of the arable soils amounts to $670\cdot 10^3$ ha; of which about 7.5% is subjected to serious soil loss. The most distinguishing features of the territory are the general elevation (absolute heights between 130–310 m a.s.l.), good natural drainage conditions, lack of primary salinity, and deep groundwater table (10–15 m). Soil-forming rock is loess-like, nonsaline silty clay loam, which characteristically provides high aeration. The mineral material of the deposits was subjected to syngenetic changes in response to steppe and meadow-steppe soil formation and displacements at the expenses of sheet washing during formation of the slopes in the interfluves (Shaporina, Tanasienko, 2003). This region has relatively gentle horizontal dissection, i.e., $0.6\text{--}0.8\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. As a consequence, watershed flat spaces account already for 30% of total area. Really, the steepness of the near-watershed slopes ranges from 2 to 9%. The steepness of the convex near-ravine slopes approaches to 15–30%, as corresponds to significant erosion hazard of the territory, an essential part of which (15%) is eroded from weak to medium extent. Therefore, as regards erosion, this region is also classified as being at the medium potential risk.

Kuznetsk Depression. This region is an elevated denudational plain where leached, high humus content and medium in thickness heavy-textured chernozems present the greatest agricultural significance, the latter being determined not only by their wide spreading but also by the fact that these soils are the most fertile in West Siberia. The area of arable soils of the Depression makes up to $900\cdot 10^3$ ha. It is important to emphasize that $150\cdot 10^3$ ha is eroded to various extents. Soil-forming rocks consist of loess-like loams which occupy almost all the ecosystems of erosion catena. The thickness of loess-like loams varies: high values occur in the depressions of the interfluves (up to 20–25 m) and minimum values (often less than 1 m) at the exposures of Paleozoic and other bedrocks (Khmelev, Tanasienko, 1983). The relief of the Depression is strongly dissected. Horizontal dissection varies from $0.6\text{--}0.8\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ in its western border to $1.0\text{--}2.6\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ in the remaining area. Vertical dissection is the same as in Near-Salair (75–100 m). In view of such essential dissection the watershed spaces make up to 20 % of the total area. It is necessary to emphasize that 15% of the arable land in the dissected part of the Depression is eroded from slight to moderate extent. Therefore, this geomorphological region, as well as the regions described above, should be classified as prone to a medium erosion hazard. Thus, undulating relief of the Near-Salair and Near-Ob areas as well as the Kuznetsk Depression in addition to sufficient supply with solid and liquid precipitation favors considerable surface runoff of thawing and downpour waters on the arable land; this leads to substantial losses of the soil solid phase and hence decreased chernozems' fertility.

In Near-Salair and the Kuznetsk Depression the main arable lands are represented by medium- and heavy-textured humus-rich leached chernozems (Luvic Chernozems (Siltic)) (Khmelev, Tanasienko, 2009a, 2013; IUSS Working Group WRB, 2014), in Near-Ob by medium-textured, medium in thickness ordinary chernozems (Haplic Chernozems (Siltic)) (Panfilov et al. 1976; IUSS Working Group WRB, 2014). Total area of the arable lands amounts to $2.5\cdot 10^6$ ha, the most part of which (on the average 80%) representing the non-eroded land. Non-eroded chernozems of the Near-Altai soil province perform two very important functions: a) environmental because they are the main constituent of the soil cover in the most populated area of West Siberia; b) high agronomical production as they are fundamental for grain crop production (Khmelev, Tanasienko, 1983).

A specific feature of humus horizons (A+B) is the tonguing, which is a specific feature of chernozems in West Siberia (Karetin, 1982). The thickness of humus horizons varies within the limits of 50–60 cm. The most specific and stable feature of the chernozems subjected to erosion processes is the

decrease of the thickness of humus horizons. Slightly eroded chernozems occupy the upper third of the slope; they are characterized by a reduced thickness (up to 30%) of humus horizon. Moderately eroded chernozems can be found in the middle part of the slope. The thickness of their humus horizons is reduced by 50%. Strongly eroded chernozems are found in the lowest and steepest part of the slope and do not have separate horizons (A, AB and B).

Humus content in humus-rich non-eroded chernozems which are widely spread in the Kuznetsk Depression and partly in Near-Salair amounts to 8–10%, in some cases being as high as 12–13%. Haplic Chernozems (Siltic) of Near-Ob are classified as medium in humus content. It is known that the heavier the chernozem texture is, the richer in humus their upper part of the profile is. Main “carriers” of humus in chernozems are finely dispersed particles (Tanasienko et al. 2019). Annual loss of considerable part of silty particles (no more than 200 kg · ha⁻¹ in very low-snow hydrological year and up to 330–4200 kg · ha⁻¹ in very high-snow year) led to the fact that only slightly eroded chernozems of the West Siberia in the Kuznetsk Depression are explicitly included in the group of high-humus chernozems (more than 5% C), moderately eroded to medium-humus (4.0–4.5% C) and strongly eroded transformed to low-humus chernozems (2–4% C). Sedimentation of highly dispersed particles in the lower parts of the slope caused by slow velocity of thawing and downpour water leads to the formation of slightly drift meadow chernozemic soils in ploughed layer where humus content is the same or even higher than in the non-eroded chernozems (5.8–6.8% C).

In order to assess the role of the climatic factor in the development of erosion processes in West Siberia, long-term data on precipitation including downpours were acquired and processed by variation statistics. At the same time, the lack of general consensus among specialists in soil erosion was taken into account concerning the controversy about which kind of precipitation (solid or liquid) plays a more crucial role in removing the soil cover of arable slopes. Most researchers consider that solid precipitation should be taken into account as the main factor, especially in West Siberia. The duration of a cold season is about half a year, and for this time interval a quarter of precipitation is accumulated. Apart from this, in West Siberia downpours are frequent, repeating every 5 or 6 years. For instance, in the Kuznetsk Depression during cold and warm periods (hydrological year) the total amount of liquid precipitation is *ca.* 430 mm in the very wet years, and from 450 to 500 mm during extremely wet years. The minimum amount of liquid precipitation sometimes falls to 50 mm (i.e., during the cold period, i.e. November–March). Therefore, taking into account such variation in the amount of liquid atmospheric precipitation we analyzed moisture gradations during the warm time interval for each geomorphological region under study. The gradations were also studied in detail regarding the inputs of solid precipitation on the territories during the cold time interval (Table 1). This is the case with the Kuznetsk Depression and Near-Salair areas where during the warm time interval a “very dry year” is considered to be such a year when precipitation is no more than 360 mm. In this scenario, the total amount of liquid atmospheric precipitation sometimes exceeds 450 mm. Consequently, we have to distinguish an extremely wet warm period. At the same time, extremely moist warm period was not observed in the course of almost 50 years of meteorological records in the Near-Ob area which is located in the transitional belt from forest steppe to steppe.

SPECIFIC FEATURES OF CLIMATE AS A SOIL-FORMING FACTOR

The climate of the three geomorphological regions under study, similar to the entire West Siberia, is sharply continental. Its specific features consist of different duration of the cold and warm periods of the year and uneven distribution of atmospheric precipitation (Slyadnev, 1965; <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>). The largest duration occurs in the cold period (about six months) and the shortest in spring.

The proportion of winter precipitation with respect to the annual amount is comparatively low (Table 1) and represents about 25 %, whereas in spring it represents only 10 %. Thus most of the precipitation falls during the warm season (from April to October). During the cold time interval (from November to March) the Kuznetsk Depression on average receives 100 mm of solid atmospheric precipitation, Near-Ob receives less than 90 mm and Near-Salair area receives more than 130 mm. Snow cover usually forms on the frozen soil. The duration of the preliminary winter period varies from two to three weeks.

Table 1

Precipitation in the cold (XI–III), warm (IV–X) periods and hydrological year in the forest steppe of West Siberia (Tanasienko, 2003)

Period	Description of the year	Statistical parameters				
		<i>n</i>	lim, mm	M±m, mm	δ, mm	V, %
Near–Salair, Toguchin weather station (1936–1997)						
Cold	Very low–snow	12	61–72	66±2	4.6	7
	Low–snow	10	81–90	85±1	3.6	4
	Normal–snow	11	98–105	101±1	3.0	3
	High–snow	9	108–119	114±2	4.6	4
	Very high–snow	17	122–190	148±5	17.5	12
Warm	Very dry	18	233–296	262±5	20.0	8
	Dry	14	307–330	319±2	8.3	3
	Normal	3	339–345	342±5	6.6	2
	Moist	7	361–390	369±5	11.0	3
	Very moist	15	394–450	430±8	30.1	7
	Extremely moist	4	451–490	476±4	7.4	2
Hydrological year	Very droughty	11	303–374	338	–	–
	Droughty	10	380–415	396	–	–
	Normal	18	427–462	446	–	–
	Moist	8	466–508	483	–	–
	Very moist	13	512–606	560	–	–
Near–Ob, weather station of Ordynskoye (1936–1990)						
Cold	Very low–snow	14	51–75	64±2	5.2	8
	Low–snow	4	78–88	82±3	6.2	7
	Normal–snow	10	93–105	100±2	5.2	5
	High–snow	10	106–115	111±2	4.9	4
	Very high–snow	6	129–159	141±5	13.1	10
Warm	Very dry	15	160–243	213±7	28.0	13
	Dry	9	276–300	287±3	13.0	5
	Normal	7	301–319	308±6	20.5	6
	Moist	6	332–349	344±3	8.5	3
	Very moist	9	370–497	419±12	26.3	6
Hydrological year	Very droughty	9	215–341	297	–	–
	Droughty	14	349–389	369	–	–
	Normal	5	412–435	420	–	–
	Moist	9	443–477	456	–	–
	Very moist	5	489–570	538	–	–
Kuznetsk Depression, weather station of Kolchugino (1936–1990)						
Cold	Very low–snow	8	49–75	68±3	8.4	12
	Low–snow	8	77–90	81±2	5.4	7
	Normal–snow	12	93–105	99±2	5.4	6
	High– snow	12	106–117	113±1	4.1	4
	Very high–snow	9	121–153	131±4	11.3	8
Warm	Very dry	9	67–300	287±4	12.2	4
	Dry	9	307–330	318±3	8.7	3
	Normal	7	338–360	350±4	9.7	3
	Moist	9	361–381	370±3	10.0	3
	Very moist	12	393–443	436±10	41.3	9
	Extremely moist	4	459–493	484±5	8.8	2
Hydrological year	Very droughty	5	342–379	358±8	18.9	5
	Droughty	10	389–429	405±4	12.8	3
	Normal	10	433–479	461±6	17.6	4
	Moist	4	495–428	513±7	13.9	3
	Very moist	5	533–641	569±23	50.3	9

Footnotes for Tables 1–3. Compiled from: Climatologic Reference Book of the USSR (1956); Reference Book of Climate of the USSR (1977); Meteorological Reference Book (1961–1988).

n – sampling years; lim – fluctuation of data; M – mean; m – standard error of the mean; δ – mean-square deviation; V – coefficient of variation. Dashes indicate not available data.

Precipitation is the most important factor which determines the erosive role of climate. Not all the climatic indices to the same extent influence the intensity of erosion processes. The most important indices are annual precipitation and snowfall regime. In any location the amount of precipitation varies with time and is rhythmic by its nature (Rode, 1978). Therefore, annual precipitation gives a general idea of the moisture on the territory but is associated with the fact that the higher the precipitation is, the stronger the erosion is. At the same time, it was established that the correlation between total precipitation and erosion intensity was not significant as the same precipitation amount could result in different extents of erosion (Gudzon, 1974). Considerable variation of the precipitation in the cold and warm seasons and its annual amount was related to its rhythmic falling (Table 1). While studying meteorological data for the 40–60 years long period we succeeded in observing conspicuous regularity patterns. As it was noted earlier (Slyadnev, 1965), droughty seasons are known to be repeated in cycles of ca 10–11 years. In fact, no more than half of the annual amount of precipitation falls in these years during a warm weather interval. Nevertheless, as a rule, precipitation in the cold weather interval proved to be extremely high over the course of these years (Khmelev and Tanasienko, 1983; 2009 a,b). As for the three geomorphological regions under study, erosion losses were greatly different that is why it is interesting to follow how the total amount of precipitation and slope exposure determined the erosion intensity and how solid atmospheric precipitation and radiation regime influenced snow thawing. Based on the precipitation data, it is possible to forecast yearly erosion losses due to downpour and thawing water runoff, in order to implement appropriate strategies to reduce erosion processes to admissible levels.

The same precipitation pattern was found to be peculiar to Near-Salair and Near-Ob areas for the same years. Therefore, the rhythm of precipitation which we observed in the dissected forest steppe of West Siberia confirms and supplements the observations of researches in different regions of Russia (Bazykina, Boiko, 2010; Komissarov, Gabbasova, 2014; Bazykina et al. 2015; Bazykina, Ovechkin, 2016; Gusarov et al. 2018). As for the West Siberia, purposeful soil studies on the changeability of atmospheric moistening have not been practically carried out (Tanasienko et al., 2019).

FIELD STUDIES: DATA COLLECTION AND SAMPLING

Summer precipitation and its intensity were measured by using Hydrograph unit. Water infiltration in the field was studied by the method of small flooded areas (Nesterov's method), when square or round frames with an area of 2500 cm² (external) and 625 cm² (internal) are installed on the soil surface. The outer frame is protective and the inner one is measuring. The essence of the method is to take into account the amount of water poured into the measuring frame (known area) per unit of time. To simplify and automate the water supply, the PVN-00 device is used which consists of two hermetically sealed tanks (Marriott vessels), two frames (cylindrical) of different diameters and a tripod. The calculation of water permeability is carried out in the same way as in the Nesterov method. The snow survey stage was measured using a BC-1 snow-gauge and a special metal snow scale (Mueller et al., 2016).

Descriptive statistics (Dospikhov, 1979), Microsoft Office Excel 2007 were used for the data processing.

RESULTS AND DISCUSSION

It should be pointed out that a specific feature of farming in the three geomorphological regions under study is represented by the lack of winter crops. Fallows and perennial sown pastures account for no more than 20% among agricultural lands. The sowing of spring crops begins, as a rule, in the first decade of May. During the entire May soil surface is not protected by plant cover. Therefore, the highest erosion risk in the strongly dissected forest steppe of West Siberia is in May. In May, during all the years regardless of moisture, except the dry years, precipitation varied within very narrow limits, such as 46–53 mm (Table 2). The characteristic property of the very dry vegetative season was found to be represented by a small and approximately equal precipitation, i.e. 44–54 mm, whereas in the remaining years (dry → very wet) the maximum precipitation falls in June and July. During these months the precipitation was half of that in May. However, by the end of June soil surface is closely covered by spring crops and the erosion hazard becomes essentially weaker.

It is known that total precipitation data are routinely used to assess the potential soil erosion, although the increase in summer precipitation is not always accompanied by appropriate increase in the surface runoff and the loss of solid soil phase (Cheremisinov, 1955; Zaslavsky, 1979). The value of surface runoff depends mainly on rainfalls intensity, their duration and frequency as well as on soil infiltration capacity (Livovich, 1974). It should be taken into account that about 70% of the precipitation

at the territory under study falls during the months of extreme erosion risk, i.e. May–August. At a given time, the daily maximum precipitation ranged widely (from 15 to 83 mm) in the Kuznetsk Depression and the Near-Ob area during the years with normal moistening. On the other side, daily maximum precipitation was not high in the very dry and dry warm erosion risk periods, with the exception of Near-Salair.

Table 2

Monthly precipitation during vegetational season in the years with various moistening. Kuznetsk Depression, Kolchugino weather station (1948–1988)

Month	Statistical parameters			
	lim, mm	M±m, mm	δ, mm	V, %
Very dry, <i>n</i> = 9				
May	21.4–77.9	46.2±7.9	23.9	52
June	25.1–76.8	43.9±4.8	14.3	32
July	10.1–82.9	53.7±31.0	93.0	173
August	20.3–59.0	45.1±7.5	22.5	50
Total	–	130.7	–	–
Dry, <i>n</i> = 10				
May	13.5–49.9	23.5±3.5	11.1	47
June	31.4–85.8	49.1±5.8	18.5	37
July	18.7–112.6	64.1±8.8	28.0	44
August	10.9–107.2	73.1±26.6	94.0	128
Total	–	209.8	–	–
Normal, <i>n</i> = 7				
May	23.8–98.6	53.1±10.7	28.3	55
June	35.4–120.3	74.4±12.4	32.8	44
July	23.5–100.8	68.3±12.6	33.8	49
August	18.9–70.1	45.7±9.2	24.6	54
Total	–	222.1	–	–
Moist, <i>n</i> = 6				
May	30.7–62.8	48.3±5.2	12.8	26
June	35.5–73.0	51.3±5.7	14.1	27
July	65.9–113.7	93.7±8.2	20.2	22
August	18.9–121.8	65.5±15.0	36.8	56
Total	–	258.8	–	–
Very moist, <i>n</i> = 9				
May	27.7–90.5	55.0±6.5	19.4	35
June	70.8–125.6	90.4±6.8	20.3	22
July	27.8–144.2	80.6±14.8	44.4	55
August	48.5–109.4	81.0±5.6	16.8	21
Total	–	307.0	–	–

Footnotes: *n* – sampling years; lim – fluctuation of data; M – mean; m – standard error of the mean; δ – mean-square deviation; V – coefficient of variation. Dashes indicate not available data.

In all three geomorphological regions the precipitation usually varied during the warm period within 15–46 mm, significantly increasing as the temperature rose. For instance, in the Kuznetsk Depression, the maximum daily precipitation reached 36, 67 and 49 mm in May, June and July respectively, in the very wet and warm period. It was supposed that all daily rains—as heavy as 20 mm and more—were associated with significant erosion hazards (Kaufluss, 1980). However, it should be noted that rains with comparatively smaller daily precipitation can also lead to substantial erosion risks. In West Siberia and in the Kuznetsk Depression in particular considerable part of liquid precipitation falls as downpours. Maximum precipitation during a downpour varied 50–54 mm in the Kuznetsk Depression.

In May downpours were infrequent and poor, precipitating 10–16 mm (Table 3). However, they fall on the soil unprotected by plant cover, and hence significant erosion loss of soil solid phase in arable lands occurred on the slopes. The most frequent downpours occurred in June and July, especially in the normal and extremely wet years. For instance, 5–8 downpours fall in June and July, whereas in the normal and extremely wet years such downpours were twice as frequent. Of course, the risk of erosion

by rains in June and July was much lower than in May, but in the course of these two months it was 2–3 times higher than in May.

Table 3

Description of downpours in the years with different moistening (Kolchugino weather station). Roman numbers indicate months of the year

Description of the years	Months				Total downpours, V–VIII, mm*	Total precipitation, V–VIII, mm	Downpours, % of total sum for V–VIII
	V	VI	VII	VIII			
Very dry, n= 3	–	14.1/1	62.9/4	68.0/5	145.0/10	318.8	45
Dry, n= 3	27.0/2	40.5/3	84.9/6	18.5/2	170.9/13	729.3	23
Normal, n= 3	13.3/1	93.2/6	111.3/7	62.3/4	280.1/18	769.5	36
Moist, n= 3	16.5/1	38.8/3	93.6/4	71.8/5	219.7/13	839.3	26
Very moist, n= 1	–	41.6/3	77.4/3	12.2/1	131.2/7	384.3/1	34
Extremely moist, n=3	10.1/1	104.7/7	84.8/7	41.2/3	240.8/18	1312.5	18

Footnotes: *Left-hand value refers to total precipitation, mm; right-hand value refers to number of downpours.

Comparing regions under study, one should note that the most prolonged and intensive downpours were recorded in the Kuznetsk Depression. For instance, in June 1977 the downpour delivered a total of 39 mm, being extremely intensive (2.7 mm per min) for 10 minutes, and in July 1983 the precipitation amounted to 22.4 mm in 7 minutes. The same territory obtained 48 mm of rain that was highly intensive during the first hour (1.9 mm per min for 5 minutes and 0.43 mm per min for the first hour) and low over 12 hours with intensity of 0.04 mm per min (Meteorological Reference Book, 1961–1988). Rather intensive and prolonged downpours were recorded in the Near-Salair area, in particular on July 10, 1963, when there was a downpour totalling 84 mm, its temporal intensity being as follows: 5 min: 1.6; 10 min: 1.4; 20 min: 1.0; 1 h: 0.30; 12 h: 0.07 (Orlov, 1971). As for the Near-Ob area, we never succeeded in finding there in 1984–1993 period the downpours of intensity and amount exceeding 0.5 mm · min⁻¹ and 10 mm, respectively. These observations confirm that downpours were not associated with erosive risks, and eroded soils began to form due to surface runoff from the thawing water. In fact, the only intrinsic effect of downpours did not represent severe hazard to soil cover of the sloping surfaces if their intensity is smaller than water infiltration, which is of special importance in the dissected regions. First, infiltration values inform about the degree “absorption” of atmospheric precipitation, downpours in particular, and possible formation of surface runoff. Second, according to our results infiltration rate changes in soils displaying different degrees of erosion. Since the eroded and non-eroded chernozems and drift meadow chernozemic soils are located on different positions of the drainage basin, it can be confirmed that water infiltration varies greatly throughout the whole drainage basin as well as in the individual plots of the slope; this fact adversely affects the accumulation of warm period precipitation and the water balance of the territory as a whole and leads to the increase both surface runoff and erosion processes. Nevertheless, in the case of the water infiltration throughout the whole drainage basin (even though such a case can hardly occur) erosion resilience of soils will depend to a certain degree on their slope location: the lower positions of the slope where water enters from the top are exposed to the greater water absorption load as compared with the overlying plots (Burykin, 1972). Therefore, the water infiltration of all slightly drift meadow chernozemic soils without an exception was considerably higher even in comparison with the non-eroded chernozems which occupy slightly sloping watershed areas. The high infiltration of slightly drift meadow chernozemic soils can be explained by the fact that the drift layer of these soils consists of sorted water-stable aggregates of more than 1 mm in diameter. During its flow along the slope, the downpour water causes a loss of the solid phase; this phase sediment on the surface of meadow chernozemic soils as a consequence of the decreased velocity of the water flow. Characteristically, the biggest infiltration rate (judging by the third hour of observation) was recorded for the podzolized non-eroded and slightly eroded chernozems of the Kuznetsk Depression (more than 1 mm · min⁻¹). Infiltration rate of moderately eroded chernozems is two times less than that of non-eroded and slightly eroded soils.

The lowest infiltration rate ($0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) was characteristic for strongly eroded chernozems. Due to the low content of humus and organic colloids (mainly humic acids) that contribute to soil structure formation, water permeability of the non-eroded chernozems of the Near-Salair and Near-Ob areas was approximately half of that in the similar soils of the Kuznetsk Depression. In particular, humus depletion is a major driver of soil degradation after soil structure destruction, soil compaction and soil biodiversity loss, i.e. conditions which make soils prone to accelerated erosion (Lal, 2004). As for the eroded chernozems of the Near-Salair and Near-Ob areas, the infiltration rate there was found to be extremely low, ranging $0.23\text{--}0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. In those areas the downpours with intensity exceeding $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ should cause surface runoff on chernozem at the sloping surfaces. Previous observations (Surmach, 1955) reported that surface runoff occurred already due to 5 min of downpour. As a rule, in most cases the downpours last for 5–7 minutes, resulting in 10–15 mm of precipitation (sometimes 30–50 mm over more prolonged time intervals), so that the high kinetic energy of the surface runoff of downpour water becomes obvious.

Many authors noted that because of intensive rains, the slope runoff, especially from the steep slopes, is greater on arable lands than on virgin or lay lands (Konovalov, Pyzhov, 1969; Spomer et al., 1973), resulting in high removal of soil material on arable slopes. Furthermore, due to downpours the amount of water per unit area of soil surface is several times higher than due to the intensive snow thawing (Makkaveev, 1975). Moreover, the amount of removed soil can average from 100–160 up to 500 $\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, which is equivalent to 10–50 mm of soil profile (Luca, 1963; Gorbunov, Ryabov, 1972; Lal, 1976; Zaslavsky, 1979; Schwertmann, 1981). The chernozems under study are heavy-textured but downpours prove to be extremely destructive in light-textured soils as compared with chernozems. For instance, under subtropical conditions of the Mediterranean region (e.g., Spain) where luvisols are mainly characterized by loamy sand texture, the August downpour was as intensive as 70 mm for 45 minutes. As a result, the loss of soil mineral part ranged from 200 to 700 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ and more, as measured in runoff plots (10 m wide and 50 m long). It is noted that the least loss was found to occur under minimum (zero) soil tillage practices (De Alba et al. 2003). In this line, the analyses by Nunes et al. (2016) of the spatial variability of annual precipitation and erosion in southern Portugal suggested that their decrease was partly counterbalanced by an increase in their intensity i.e., that the recorded decrease in precipitation should not be interpreted as a decline in the potential risk of soil erosion. This is in line with the studies by Strohmeyer et al. (2016) in plot locations in Austria who also found that the magnitudes of the large extreme events may overcome the effect of its low occurrence probabilities, and therefore, the large extreme events effectively contribute to the long-term soil loss.

The processes of soil erosion caused by downpours essentially differ from the thawing water erosion (Kalianov, 1974). During the warm time interval the surface water runoff occurs only on the moist and sometimes on the dry sloping surface, rather than on extremely moist surface which is in the “fluidity stage” like during snow thawing. The slope exposure is of low importance during downpour precipitation, whereas during snow thawing its importance is very high. In the warm time interval the steepness of the slope and soil-protective capacity of plants play a substantial role in mitigating the downpour effects.

The largest soil loss due to erosion occurs during downpours in fallow fields (Hairston et al., 1984) with tilled and close-growing crops, but in early stages of development of plants when their soil-protective capacity is still low (beginning or middle of June). During heavy showers the erosion loss of solid phase of slightly eroded leached chernozems averaged $4.6 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ when the slope inclination was up to 5% (Table 4). With increasing slope inclination, and consequently the flow kinetic energy, the removed mass sharply increases (Wischmeier et al. 1958). This is the case with Kuznetsk Depression, where the soil loss already reached $16 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ at slopes of 5–9% and $22 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ at slopes of 9–15%, as estimated by Khmelev and Tanasienko (1983).

The most abundant and intensive downpour during the study was observed on July 24, 1970. For the first 10 min the downpour intensity was $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, then for 21 min it was $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. As the surface of the leached, medium thickness, heavy-textured chernozems was protected by the well-developed wheat plants, downpours did not seriously destroy the soils of 3–5% slopes, where soil loss was not more than $2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Nevertheless, on steeper slopes (5–15%) the soil loss was considerable and ranged from 23 to $48 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. In the lower near-narrow part of the slope, at the lower altitude than the wheat field, the fallow plot was prepared for the forest belt as wide as 15–20 m. In some places of this plot the downpour washed off completely the ploughed layer as wide as 30 cm; the depth and width of the rain channels was

Table 4

Downpour loss of solid phase of chernozems of different erosion degree

Month	Crop	Degree of soil erosion	Steepness of slope, %	Precipitation, mm	Downpour intensity, mm·min ⁻¹	Runoff, mm	Soil loss, mg·ha ⁻¹
Kuznetsk Basin							
May	Wheat	Slight	3–5	25.0	1.2	13.8	5.3
June				36.0	1.5	18.0	6.2
July				38.5	1.1	17.3	5.1
July				41.0	1.5	18.0	6.2
June	Corn	Moderate	5–9	25.6	1.5	15.3	2.0
June				36.0	1.0	19.5	1.5
July				17.0	1.3	9.0	1.2
August				19.0	1.2	10.0	1.2
August				38.5	1.1	16.0	1.7
August				30.0	1.0	18.5	2.9
May	No corn	Moderate	5–9	25.0	1.2	15.0	2.2
July				41.0	1.3	28.7	23.5
July				36.0	1.3	19.8	12.5
July		Strong	9–13	25.0	1.2	18.7	15.6
July				36.0	1.3	17.3	12.5
July				41.0	1.3	19.8	46.7
Near–Salair							
June	Wheat	Slight	1.5	40.0	2.0	32.0	12.5
June	Wheat	Moderate	1.5–5	40.0	2.0	32.0	50.0

measured as 44 and 220 cm, respectively. Therefore, general soil mass loss amounted to ca. 24 m³ from every rain channel. Podzolized loamy chernozems of Near-Salair are characterized by very high erosion loss. As compared to non-eroded chernozems, their insignificant erosion-preventive resilience can be explained by the reduced content of clay and humus, i.e. the mineral and organic glues, combined with not high cation exchange capacity; therefore, these soils are washed off intensively. It is remarkable that in these soils at the same slopes the thawing waters remove 3–4 times less solid phase than during downpours. According to our calculations it takes 53–110 m³ of thawing water to wash off 1 Mg of chernozem in West Siberia, whereas during downpours the respective amount is estimated as 8–50 m³. Such difference in erosion losses due to the snow-thawing runoff or the downpour waters can be explained by the fact that during snow melting in low-snow hydrological years the thawing waters are in contact with the surface of thawed soil for 4–6 hours during 3–5 days, averaging 12–30 hours. In high and very high-snow hydrological years the duration of contact of thawing water with the surface of slope chernozems increases up to 6–10 days, making up to 30–50 hours. As for the downpour water, its contact with the surface of chernozems lasts for 10–40 min. It is necessary to keep in mind that downpour water is partly absorbed by a warm soil profile, and during snowmelt the depth of the maximum soil defrosting is 5–20 cm. Beyond the thawed layer the soil is in a frozen state and practically does not absorb thawing water.

CONCLUSIONS

In West Siberia heavy rains cause significant damage to agricultural land only locally, during early spring, when the soil is not protected by vegetation. The greatest erosion hazard is represented by meltwater, and not only by its total amount, but also by the thawing rate. In both cases, soil permeability plays an important role in the resulting runoff amounts. The vulnerability to soil erosion in the studied area was found to be as follows: the Kuznetsk Depression > Near-Salair > Near-Ob (no storm damage). These studied regions were characterized by i) the prevalence of precipitation during the warm growing season; ii) sporadic or cyclical precipitation patterns; and iii) a significant decrease in the infiltration rate during extensive agriculture as the important factor determining the degradation of the main fertile soils in West Siberia.

FINANCIAL SUPPORT

The study was carried out with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to the state assignment for the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 121031700309-1).

REFERENCES

1. Bazykina G.S., Boiko O.S. Moisture regime of typical chernozems under the mown Steppe and plowland of Kursk oblast under the anomalous weather conditions of the last decades, *Eurasian Soil Science*, 2010, T. 43, No. 1, p. 49–61. DOI: [10.1134/S1064229310010072](https://doi.org/10.1134/S1064229310010072)
2. Bazykina G.S., Izvekov A.S., Zhdanov S.G. Water regime and productivity of Ciscaucasian ordinary agrochernozems in anomalous weather conditions (2007–2013), *Eurasian Soil Science*, 2015, T. 48, No. 3, p. 257–267. DOI: [10.1134/S1064229315010020](https://doi.org/10.1134/S1064229315010020)
3. Bazykina G.S., Ovechkin S.V. The influence of climate cycles on the water regime and carbonate profile in chernozems of Central European Russia and adjacent territories, *Eurasian Soil Science*, 2016, T. 49, No. 4, p. 437–449. DOI: [10.1134/S1064229316040025](https://doi.org/10.1134/S1064229316040025)
4. Burykin A.M. *Erosion degree of gray forest and chernozemic of Central Chernozem Region in connection with agrotechnical ways of erosion control*. Proceedings of Kursk Agricultural Institute, 1972, Vol. 7, p. 180–197. (in Russian)
5. Gorbunov I.F., Ryabov Ye.I. Problems of soil protection in Stavropol Territory, *Bulletin of Stavropol Research Institute of Agriculture*, 1972, Vol. 13, p. 34–39. (in Russian)
6. Gudzon N. *Soil Conservation and Erosion Control*. Moscow, Kolos Publ., 1974, 303 p. (in Russian)
7. Dospekhov V.A. *Field Experiment Technique (With Statistic of Researches)*. Moscow, Kolos Publ., 1979, 423 p. (in Russian)
8. Kalianov K.S. *Soil erosion in Uliyanovsk Region*. In book: Soil erosion and Land Use. Ulyanovsk Pedagogical Institute Publ., 1974, p. 87–100. (in Russian)
9. Karetin LN. *Chernozems and meadow soils of Tobol-Irtish interfluve*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1982, 256 p. (in Russian)
10. Konovalov I.I., Pyzhov V.G. *On the changes of runoff and erosion loss on sloping lands*. In book: Meteorology, Climatology and Hydrology. Kiev University Publ., 1969, Vol. 4, p. 180–184. (in Russian)
11. *Reference Book of Climate of the USSR / 1956*, Hydrometeorological Service Publ., Is., 20, Part 2, p. 133. (in Russian)
12. *Reference Book of Climate of the USSR / 1977*, Novosibirsk Publ., Is., 20, Part 2, p. 3–129. (in Russian)
13. Livovich M.I. *World Water Resources and their Future*. Moscow, Mysl Publ., 1974, 448 p. (in Russian)
14. Makkaveev N.I. *Principal regularities of sheet erosion*. In book: Principal Problems of Soil Conservation. Moscow University Publ., 1975, p. 11–13. (in Russian)
15. *Meteorological Reference Book 1961–1988*. West-Siberian Administration of Hydromet. Service, Novosibirsk, Part 2, Is., 20, No. 1–12. (in Russian)
16. Orlov A.D. *Water erosion of soils of Novosibirsk Near-Ob area*. Novosibirsk Nauka Publ., 1971, 176 p. (in Russian)
17. Orlov A.D. *Erosion and erosion-dangerous lands of West Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 207 p. (in Russian)
18. Panfilov V.P., Chashchina N.I., Goff V.F. 1976. *Ordinary chernozems*. In book: Agrophysical description of soils of West Siberia. SB RAS Publ., 1976, p. 339–341. (in Russian)
19. Rode AA. *Long-term variability of atmospheric precipitation and water balance of soils*. In book: Problems of Water Regime of Soils. Leningrad Hydromet. Publ., 1978, p. 3–129. (in Russian)
20. Slyadnev A.P. *Geography of West Siberia*. Novosibirsk Nauka Publ., 1965, Is. 1, p. 3–23. (in Russian)
21. Surmach G.P. On conditions determining absorption of thawing water, *Agriculture*, 1955, No. 1, p. 8–12. (in Russian)
22. Tanasienko AA. *Specificity of soil erosion in Siberia*. Novosibirsk SB RAS Publ., 2003, 176 p. (in Russian)
23. Khmelev V.A., Tanasienko A.A. *Chernozms of Kuznets hollow*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1983, 256 p. (in Russian)
24. Khmelev V.A., Tanasienko A.A. *Land resources of Novosibirsk region and ways of their rational use*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2009 a, 349 p. (in Russian)
25. Cheremisinov GA. 1955. *Eroded soils and their productive use*. Moscow Kolos Publ., 1955, p. 136. (in Russian)
26. Shaporina N.A., Tanasienko A.A. Specificities of consistence, water and frost regime of soils and grounds of Near-Ob area and their influence on the processes of migration of moisture on irrigation, *Pochvovedenie*, 2003, No. 9, p. 1106–1113. (in Russian)
27. Zaslavsky M.N. *Soil Erosion*. Moscow: Mysl Publ., 1979, 255 p. (in Russian)
28. Daniel J, Holz DJ, Williard WJ, Edwards PJ, Schoonover JE. Soil Erosion in Humid Regions, A Review, *J. Contemporary Water Res Education*, 2015, No. 154, p. 48–59. DOI: [10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x](https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x)

29. De Alba S, Benito G, Lacasta C., Pérez-González F. Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva del clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha, *Edafología*, 2003, No. 10, p. 103–113.
30. Golosov VN, Koiter A, Ivanov M, Maltsev K, Gusarov A, Sharifullin AG, Radchenko I. Assessment of soil erosion trend in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years, *J. Soils Sediments.*, 2018, No. 18, p. 3388–3403. DOI: [10.1007/s11368-018-2032-1](https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1)
31. Gusarov A.V, Golosov V.N, Sharafullin A.G, Gafurov A.M. Contemporary trend in erosion of arable southern chernozems (haplic chernozems pachic) in the west of Orenburg oblast (Russia), *Eurasian Soil Science*, 2018, No. 5, p. 561–575. DOI: [10.1134/S1064229318050046](https://doi.org/10.1134/S1064229318050046)
32. Hairston JE, Sanford JO, Hayes JC, Reinschmiedt LL. Crop yield, soil erosion and net returns from tillage systems in the Mississippi Black Land Prairie, *J. Soil Water Conserv.*, 1984, No. 39, p. 391–395.
33. Hudson, PF, Inbar M. Land degradation and geodiversity: Anthropogenic controls on environmental change (Editorial), *Land Degrad Develop.*, 2012, No 23, p. 307–309. DOI: [10.1002/ldr.2156](https://doi.org/10.1002/ldr.2156)
34. IUSS Working Group WRB, *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
35. Kauffluss W. Abhängigkeit bodenerosiver Prozesse von der jahreszeitlich variierenden Belastungsintensität, *Wissenschaftliche Zeitschrift des Pädagogischen Institutes K.F.W. Wander*, 1980, No. 3, p.11–18.
36. Khmelev V.A, Tanasienko A.A. Chernozem soils of Novosibirsk oblast: problems of their rational use and preservation, *Contemporary Problems Ecol.*, 2009 b, No. 2, p. 631–641. (in Russian)
37. Komissarov M.A, Gabbasova I.M. Snowmelt-induced soil erosion on gentle slopes in the southern Cis-Ural region, *Eurasian Soil Science*, 2014. No. 6, p. 598–607. DOI: [10.1134/S1064229314060039](https://doi.org/10.1134/S1064229314060039)
38. Lal R. Soil erosion on Alfisol in West Nigeria. Effects of slope, crop rotation and residue management, *Geoderma*, 1976, No. 5, p. 363–376.
39. Lal R. Soil degradation by erosion, *Land Degrad Develop.*, 2001, No. 126, p. 519–539.
40. Lal R. Carbon sequestration in soils of Central Asia, *Land Degrad Develop.*, 2004, No. 15, p. 563–572.
41. Luca A. Combateral eroziunii si refecarea fertilitatii solucili in podisol central Moldovenesc, *Probleme Agricole – Bucuresti*, 1963, No. 8, p. 28–32.
42. Mueller L, Sheudshen, A. K., Eulenstein, F. (Eds.). *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*, Springer, 2016, 760 p. DOI: [10.1007/978-3-319-24409-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_7)
43. Nunes A.N, Lourenço L, Vieira A., Bento-Gonçalves A. Precipitation and erosivity in southern Portugal: seasonal variability and trends (1950–2008), *Land Degrad Develop.*, 2016, No. 27, p. 211–222. DOI: [10.1002/ldr.2265](https://doi.org/10.1002/ldr.2265)
44. Owens P.N. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change, *J. Soils Sediments.*, 2020, No. 20, p. 4115–4143. DOI: [10.1007/s11368-020-02815-9](https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9)
45. Schwertmann U. Bodenerosion durch Wasser-Ursachen, Ausgab, Vorhersage, *Landwirtschaft Forsch.*, 1981, No. 37, p. 117–121.
46. Spomer R.G., Saxton R.E., Heineman H.G. Water yield and erosion response to land management, *J. Soil Water Conserv.*, 1973, No. 28, p. 168–171.
47. Strohmeier S., Laaha G., Holzmann H., Klik A. Magnitude and occurrence probability of soil loss: a risk analytical approach for the plot scale for two sites in lower Austria, *Land Degrad Develop.*, 2016, No. 27, p. 43–51. DOI: [10.1002/ldr.2354](https://doi.org/10.1002/ldr.2354)
48. Tanasienko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P, Filimonova D.A. The Impact of climatic humidity of the South-Eastern part of the West Siberia on spring deficiency of moisture in the profile of eroded chernozems, *Eurasian Soil Sc.*, 2019, No. 52, p. 935–945. DOI: [10.1134/S1064229319080143](https://doi.org/10.1134/S1064229319080143)
49. Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. Evaluation of factors in the soil loss, *J. Agric Engineer.*, 1958, No. 39, p. 458–462.

Received 02 July 2021

Accepted 28 October 2021

Published 04 November 2021

About the authors:

Tanasienko Anatoly A. – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Soil Physical Processes, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); tanasienko@issa-siberia.ru

Chumbaev Alexander S. – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Physical Processes, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); chumbaev@issa-siberia.ru

Yakutina Olga P. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); oyakutina@issa-siberia.ru

Almendros Gonzalo – Professor, Head of the laboratory of Humus Chemistry, Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), Madrid, Spain; humus@mncn.csic.es

Klenov Boris M. – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geography and Soil Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); klenov@issa-siberia.ru

ЛИВНЕВАЯ ЭРОЗИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 А.А. Танасиенко ¹, А.С. Чумбаев ¹, О.П. Якутина ¹,
Г. Almendros ², Б.М. Кленов ¹

Адрес: ¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: tanas40@ngs.ru, chumbaev@issa-siberia.ru, oyakutina@issa-siberia.ru, klenov@issa-siberia.ru

²Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), Serrano 115 B, E-28006 Madrid, Spain; E-mail: humus@mncn.csic.es

Целью исследования было 1) установить основные закономерности формирования поверхностного ливневого стока и 2) оценить масштабы эрозионных процессов на пахотных черноземах в условиях расчлененного рельефа и резко континентального климата. Влияние ливней и почвенно-физических факторов на эрозию почв изучали в пределах трех больших геоморфологических районов на юго-юго-востоке Западной Сибири. Полевые наблюдения проводили в Кузнецкой котловине и Приобье в 1968–1979 и 1984–1986 гг. соответственно, в Присалаирье – с 1995 года по настоящее время. Полевые замеры водопроницаемости проводили методом Нестерова на небольших заполняемых водой участках, где установленные на поверхности почвы квадратные или круглые рамки ограничивали площадь 2500 см² (внешняя) и 625 см² (внутренняя). Количество и интенсивность осадков измеряли с помощью гидрографа. На основании собственных наблюдений и многолетних данных метеорологических станций (1936–1997 гг.) изучены пределы варьирования количества и интенсивности ливневых осадков, их пиковые значения. Исследованы и обобщены данные по водопроницаемости почв, объемам жидкого и твердого стоков на основных типах почв данной территории – серых лесных почвах, выщелоченных и оподзоленных черноземах, различающихся по степени эродированности и содержанию органического вещества. Исследованные территории по степени уязвимости к эрозии располагаются в следующем порядке: Кузнецкая котловина > Предсалаирье > Приобье. Продолжительность и интенсивность твердых и жидких осадков играют ключевую роль в развитии поверхностного стока. Сильные дожди наносят значительный ущерб сельскохозяйственным угодьям только локально, ранней весной, когда почва не защищена растительностью. С крутых склонов ежегодно теряется порядка 10–20 т/га твердой фазы почвы. Проницаемость почв играет важную роль в формировании объемов стока, как в случае ливней, так и талых вод.

Ключевые слова: расчлененная лесостепь; водопроницаемость; интенсивность стока; поверхностный сток; потери почвы; серая лесная почва; выщелоченный чернозем; оподзоленный чернозем; Западная Сибирь.

Цитирование: Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Алмендрос Г., Кленов Б.М. Ливневая эрозия черноземов Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 2. e145. doi: [10.31251/pos.v4i2.145](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.145)

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансировании от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект №121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vazykina G.S., Voiko O.S.* Moisture regime of typical chernozems under the mown Steppe and plowland of Kursk oblast under the anomalous weather conditions of the last decades // *Eurasian Soil Science*. 2010. Т. 43. No. 1. p. 49–61. DOI: [10.1134/S1064229310010072](https://doi.org/10.1134/S1064229310010072)

2. Bazykina G.S., Izvekov A.S., Zhdanov S.G. Water regime and productivity of Ciscaucasian ordinary agrochernozems in anomalous weather conditions (2007–2013) // *Eurasian Soil Science*. 2015. T. 48. No. 3. p. 257–267. DOI: [10.1134/S1064229315010020](https://doi.org/10.1134/S1064229315010020)
3. Bazykina G.S., Ovechkin S.V. The influence of climate cycles on the water regime and carbonate profile in chernozems of Central European Russia and adjacent territories // *Eurasian Soil Science*. 2016. T. 49. No. 4. p. 437–449. DOI: [10.1134/S1064229316040025](https://doi.org/10.1134/S1064229316040025)
4. Бурыкин А.М. Эродированность серых лесных и черноземных почв ЦЧО в связи с агротехническими приемами борьбы с эрозией. Науч. тр. Курск СХИ, Т.7. Вып. I. 1972. С. 180–197.
5. Горбунов И.Ф., Рябов Е.И. Задачи охраны почв в Ставропольском крае // Ставропол. НИИСХ. 1972. Вып. 13. С. 34–39.
6. Гудзон Н. Охрана почв и борьба с эрозией. Пер с англ. М.: Колос, 1974. 303 с.
7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 1979. 423 с.
8. Кальянов К.С. Эрозия почв в Ульяновской области // Эрозия почв и землепользование. Изд-во Ульяновск. пед. ин-та. 1974. С. 87–100.
9. Каретин Л.Н. Черноземные и луговые почвы Тобол-Ишимского междуречья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 294 с.
10. Коновалов И.И., Пыжов В.Г. Об изменении стока и смыва на склоновых землях // Метеорология, климатология и гидрология: Межведомств. Науч. сб. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1969. Вып. 4. С. 180–184.
11. Климатологический справочник СССР / Л.: Гидрометеиздат, 1956. Вып. 20. Часть II, С. 133.
12. Климатический справочник СССР / Новосибир. изд-во, 1977. Выпуск 20. Часть 2. С. 3–129.
13. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
14. Маккавеев Н.И. Основные закономерности плоскостной эрозии // Основные проблемы охраны почв. Изд-во Моск. ун-та, 1975. С.11–13.
15. Метеорологический ежегодник 1961–1988 / Новосибирск: Зап. - Сиб. террит. упр. по гидрометеорологии и контролю природной среды, Часть 2. Вып. 20. № 1–12.
16. Орлов А.Д. Водная эрозия почв Новосибирского Приобья. Новосибирск: Наука: 1971. 176 с.
17. Орлов А.Д. Эрозия и эрозионно-опасные земли Западной Сибири. Новосибирск, Наука, 1983. 207 с.
18. Панфилов В.П., Чащина Н.И., Гофф В.Ф. Обыкновенные черноземы // Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1976. С. 339–341.
19. Роде А.А. Многолетняя изменчивость атмосферных осадков и водного баланса почв // Вопросы водного режима почв. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 3–129.
20. Сляднев А.П. Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго-востоке Западно-Сибирской равнины // География Западной Сибири. Сб.1. Новосибирск: Наука, 1965. С. 3–23.
21. Сурмач Г.П. Об условиях, определяющих поглощение почвой талых вод // *Земледелие*. 1955. № 1. С. 8–12.
22. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2003. 176 с.
23. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Черноземы Кузнецкой котловины. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 256 с.
24. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Черноземы Новосибирской области, пути их рационального использования и охраны // *Сиб. экол. журнал*. 2009 г. № 2. С. 151–164.
25. Черемисинов Г.А. Эродированные почвы и их продуктивное использование. М.: Колос, 1955. С. 136.
26. Шапорина Н.А., Танасиенко А.А. Особенности сложения, водного и мерзлотного режимов почвенно-грунтовых толщ Приобья и их влияние на процессы миграции влаги при орошении // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1106–1113.
27. Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979, 255 с.
28. Daniel J, Holz DJ, Williard WJ, Edwards PJ, Schoonover JE. Soil Erosion in Humid Regions // *A Review. J Contemporary Water Res Education*. 2015. No. 154. p. 48–59. DOI: [10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x](https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x)
29. De Alba S, Benito G, Lacasta C., Pérez-González F. Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva del clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha // *Edafología*. 2003. No. 10. p. 103–113.
30. Golosov VN, Koiter A, Ivanov M, Maltsev K, Gusarov A, Sharifullin AG, Radchenko I. Assessment of soil erosion trend in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // *J. Soils Sediments*. 2018. No. 18. p. 3388–3403. DOI: [10.1007/s11368-018-2032-1](https://doi.org/10.1007/s11368-018-2032-1)
31. Gusarov A.V, Golosov V.N, Sharafullin A.G, Gafurov A.M. Contemporary trend in erosion of arable southern chernozems (haplic chernozems pachic) in the west of Orenburg oblast (Russia) // *Eurasian Soil Science*. 2018. No. 5. p. 561–575. DOI: [10.1134/S1064229318050046](https://doi.org/10.1134/S1064229318050046)
32. Hairston J.E, Sanford J.O, Hayes J.C, Reinschmiedt L.L. Crop yield, soil erosion and net returns from tillage systems in the Mississippi Black Land Prairie // *J. Soil Water Cons*. 1984. No. 39. p. 391–395.
33. Hudson, P.F, Inbar M. Land degradation and geodiversity: Anthropogenic controls on environmental change (Editorial) // *Land Degrad Develop*. 2012. No. 23. p. 307–309. DOI: [10.1002/ldr.2156](https://doi.org/10.1002/ldr.2156)

34. IUSS Working Group WRB, *World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
35. Kauffluss W. Abhängigkeit bodenerosiver Prozesse von der jahreszeitlich variierenden Belastungsintensität // *Wissenschaftliche Zeitschrift des Pädagogischen Institutes K.F.W. Wander*. 1980. No. 3. p.11–18.
36. Khmelev V.A, Tanasienko A.A. Chernozem soils of Novosibirsk oblast: problems of their rational use and preservation // *Contemporary Problems Ecol*. 2009b. No. 2. p. 631–641.
37. Komissarov M.A, Gabbasova I.M. Snowmelt-induced soil erosion on gentle slopes in the southern Cis-Ural region // *Eurasian Soil Science*. 2014. No. 6. p. 598–607. DOI: [10.1134/S1064229314060039](https://doi.org/10.1134/S1064229314060039)
38. Lal R. Soil erosion on Alfisol in West Nigeria. Effects of slope, crop rotation and residue management // *Geoderma*. 1976. No. 5. p. 363–376.
39. Lal R. Soil degradation by erosion // *Land Degrad Develop*. 2001. No. 126. p. 519–539.
40. Lal R. Carbon sequestration in soils of Central Asia // *Land Degrad Develop*. 2004. No 15. p. 563–572.
41. Luca A. Combateral eroziunii si refecarea fertilitatii solucili in podisol central Moldovenesc // *Probleme Agricole Bucuresti*. 1963. No. 8. p. 28–32.
42. Mueller L, Sheudshen, A. K., Eulenstein, F. (Eds.). *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*, Springer, 2016. 760 p. DOI: [10.1007/978-3-319-24409-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_7)
43. Nunes A.N, Lourenço L, Vieira A., Bento-Gonçalves A. Precipitation and erosivity in southern Portugal: seasonal variability and trends (1950–2008) // *Land Degrad Develop*. 2016. No. 27. p. 211–222. DOI: [10.1002/ldr.2265](https://doi.org/10.1002/ldr.2265)
44. Owens P.N. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change // *J. Soils Sediments*. 2020. No. 20. p. 4115–4143. DOI: [10.1007/s11368-020-02815-9](https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9)
45. Schwertmann U. Bodenerosion durch Wasser-Ursachen, Ausgab, Vorhersage // *Landwirtschaft Forsch*. 1981. No 37. p. 117–121.
46. Spomer R.G, Saxton R.E, Heineman H.G. Water yield and erosion response to land management // *J. Soil Water Conserv*. 1973. No. 28. p. 168–171.
47. Strohmeier S, Laaha G, Holzmann H, Klik A. Magnitude and occurrence probability of soil loss: a risk analytical approach for the plot scale for two sites in lower Austria // *Land Degrad Develop*. 2016. No. 27. p. 43–51. DOI: [10.1002/ldr.2354](https://doi.org/10.1002/ldr.2354)
48. Tanasienko A.A, Chumbaev A.S, Yakutina O.P, Filimonova D.A. The Impact of climatic humidity of the South-Eastern part of the West Siberia on spring deficiency of moisture in the profile of eroded chernozems // *Eurasian Soil Science*. 2019. No. 52. p. 935–945. DOI: [10.1134/S1064229319080143](https://doi.org/10.1134/S1064229319080143)
49. Wischmeier W.H, Smith D.D, Uhland R.E. Evaluation of factors in the soil loss // *J. Agric Engineer*. 1958. No. 39. p. 458–462.

Поступила в редакцию 02.07.2021

Принята 28.10.2021

Опубликована 04.11.2021

Сведения об авторах:

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); tanasienko@issa-siberia.ru

Чумбаев Александр Сергеевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); chumbaev@issa-siberia.ru

Якутина Ольга Петровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); oyakutina@issa-siberia.ru

Алмендрос Гонзало – профессор, заведующий лабораторией химии гумуса, Национальный музей естественных наук (Мадрид, Испания); humus@mncn.csic.es

Кленов Борис Максимович – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); klenov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 М.Т. Устинов, [Д.А. Гаврилов](#)^{ID}, Н.В. Елизаров^{ID}

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: ustinov@issa-siberia.ru

Приведен исторический обзор научно-практических материалов по разработке проектов мелиорации почв Западной Сибири, показана необходимость их глубокого научного сопровождения. Рассматриваются методы и способы обоснования проектов мелиорации территории, разработанные коллективами исследователей различных специальностей: Института почвоведения и агрохимии СО РАН (СО АН СССР), Почвенного института им. В.В. Докучаева, Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ) им. А. Н. Костякова.

Ключевые слова: мелиорация; Западная Сибирь; почвенно-мелиоративная карта; мелиоративные мероприятия.

Цитирование: Устинов М.Т., [Гаврилов Д.А.](#), Елизаров Н.В. Исторические аспекты развития мелиорации земель в Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. №2. с143. doi: [10.31251/pos.v4i2.143](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.143)

На Всероссийском съезде сельских хозяйств, состоявшемся в Москве 10–20 декабря 1895 г. под покровительством Великого князя Сергея Александровича Романова, было принято решение об организации в Западной Сибири Барабинской сельскохозяйственной опытной станции. Однако едва начавшиеся мелиоративные работы в Барабе были приостановлены из-за Первой мировой войны и последовавшей Октябрьской революции (Маслов, 2005). Только в 1929 г. появилось первое научное учреждение по мелиорации земель Сибири – Убинская опытно-мелиоративная станция, расположенная в 1,5 км от железной дороги у истоков крупного Карапузского канала, построенного экспедицией И.И. Жилинского (рис. 1).



Рисунок 1. Карапузский магистральный канал (слева). Убинская опытно-мелиоративная станция (справа). Типовое опытное поле Убинской ОМС (центр фотографии). Дата 31.08.2002 г.

Из-за сложившегося комплекса природных условий Западная Сибирь представляет собой крайне сложный район, требующий научно обоснованных мелиоративных мероприятий по повышению и стабилизации плодородия почв. В противном случае возрастает риск развития негативных и даже деградиционных процессов: прогрессирующего заболачивания и вторичного засоления в результате подъема минерализованных грунтовых вод. Природно-мелиоративные

условия почвообразования в регионе имеют циклично-пульсирующий характер с чередующимися фазами обводнения и аридизации, обуславливающими процессы засоления и рассоления почвенного профиля.

Естественная дренированность Западно-Сибирской равнины различна, но Барабинская и Кулундинская низменности относятся к слабодренированным территориям. Глубина залегания первого от поверхности водоупора здесь сравнительно невелика (до 5–20 м), надводоупорные толщи обладают пёстрым сложением и обводнёностью. При общем равнинном рельефе ландшафт имеет сложное строение – чередование грив и межгривных понижений, заболоченных и озерно-болотных выровненных территорий.

Очень сложная палеогеографическая история Западно-Сибирской равнины, пестрота и засоленность материнских пород, неодинаковый уровень залегания и минерализация грунтовых вод в сочетании с чередующимися циклами обводненности и аридизации определили формирование очень сложного почвенного покрова. Автоморфные почвы разбросаны небольшими контурами по вершинам грив среди преобладающих полугидроморфных и гидроморфных почв, в различной степени засоленных или заболоченных. Широко распространенные гидроморфные и полугидроморфные засоленные почвы часто находятся в различных стадиях остепнения и трансформируются в автоморфные незасоленные. Диагностируются черноземы, сохранившие черты, присущие гидроморфным почвам, такие как остаточная солонцеватость, засоленность, реликтовое осолодение и аллювиальные горизонты. Геохимический состав почвообразующих пород и почв очень сложен, а наличие бессточных областей обуславливает перераспределение и аккумуляцию солей внутри территории (рис. 2).



Рисунок 2. Сложная структура почвенного покрова: от засоленных и солонцеватых почв до лугово-черноземных солонцеватых. Юдинский плёс, оз. Чаны.

Освоение и внедрение в сельскохозяйственное производство земель со столь сложной ландшафтной мозаикой и почвенно-мелиоративными комплексами получило государственную поддержку в виде научного сопровождения проектов мелиорации. Согласно историографии мелиорации по Б.С. Маслову (2005), вслед за учреждением Убинской опытно-мелиоративной станции (УОМС), в Омском сельскохозяйственном институте в 1930 г. было сформировано «Бараббюро». Ученые Омского СХИ и УОМС вели исследования по гидрологии мелиорируемых земель, освоению засоленных почв и солонцов, тепловой мелиорации, продолжавшиеся вплоть до Великой Отечественной войны. В 1940 г. в Новосибирске создана проектная организация «Барабастройпроект» под руководством А.Д. Панадиади. С 1942 г. проводилось почвенно-мелиоративное обследование Кундранского займища площадью 30 тыс. га с целью его осушения. В феврале 1945 г. Совнарком СССР принял постановление «О мероприятиях по развитию животноводства и созданию кормовой базы в колхозах Барабинской степи Новосибирской области», предусматривающее, в том числе, активизацию мелиоративных работ.

В апреле 1947 г. была создана Барабинская экспедиция, в составе которой для исследования процессов засоления почв в регионе направляется группа ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева. Впервые почвы Барабы стали предметом глубоких исследований.

На основе обобщения материалов УОМС и Барабинской экспедиции в 1949 г. были опубликованы рекомендации ВНИИГиМ по мелиорации и освоению земель Барабы. В 1958 г. вышла книга «Мелиоративные мероприятия по Новосибирской области», где рассмотрен широкий круг вопросов по осушению болот Барабинской низменности, Кулундинской степи и зоны Приобья, улучшению лугов и пастбищ на солонцах и при лиманном орошении. Обоснованы работы по влагонакоплению на пашне, снежной мелиорации, регулированию затопления пойм и орошения дождеванием, а также сельскохозяйственному водоснабжению и гидромелиорации, использованию торфяных ресурсов. Эти обобщенные рекомендации на основе локальных опытов не позволяли в полной мере оптимизировать почвенно-мелиоративные процессы, способствующие увеличению и сохранению плодородия почв, но тем не менее помогли значительно увеличить эффективность сельскохозяйственного производства.

Академик РАН Б.С. Маслов (2005) справедливо отметил, что осушение и освоение земель в 40–50 годы XX столетия проводилось экстенсивно, методом «проб и ошибок» из-за сравнительно низкого уровня культуры земледелия, однако все затраченные ресурсы себя оправдали. Но уже в то время было ясно, что для эффективного землепользования необходимы научно обоснованные технологии и мелиоративные мероприятия.

С майского (1966) Пленума ЦК КПСС и Постановления Советов Министров СССР от 2 октября 1972 г. «О дальнейшем усилении работ по мелиорации земель и улучшении использования орошаемых и осушенных земель» начался период активного возрождения и подъема мелиорации по всей стране и в Западной Сибири в частности. Правительство провозгласило лозунг: «В широком развитии мелиорации – будущее сельского хозяйства».

В 1967 г. начал свою производственную деятельность ФГУП «Западно-Сибирский государственный институт по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства» (Запсибгипроводхоз). К решению научных проблем активно привлекали специалистов различных научных учреждений: Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО АН СССР (г. Новосибирск), институтов СО ВАСХНИЛ (р.п. Краснообск, Новосибирская обл.) и СибНИИГиМ Минводхоза СССР (г. Красноярск).

Согласно «Схеме районирования видов мелиорации по зонам РСФСР в целях повышения продуктивности земли и эффективного использования капитальных вложений», составленной Минводхозом РСФСР, на 01.11.1985 г. общий фонд земель, нуждающихся в гидромелиорациях, составлял 58,9 млн га, в том числе 52 млн га фонд регулярного орошения, 1,2 млн га – лиманного, 5,7 млн га – осушения. Мелиоративный фонд определялся, в основном, в границах сельскохозяйственных угодий. Половина фонда осушения размещалась в Западно-Сибирском экономическом районе, 20% – на территории Восточно-Сибирского и 12,5% – в Якутской АССР. По экономическим районам фонд орошения распределялся следующим образом: в Западно-Сибирском районе – 30% земель, Уральском – 16%, Восточно-Сибирском – 9%.

Большая часть территорий лиманного орошения находилась в Западно-Сибирском экономическом районе и Якутской АССР. Площадь солонцов и солонцеватых почв, характеризующихся низким естественным плодородием и плохими физико-химическими свойствами, занимала в зоне деятельности Минводхоза РСФСР 14,2 млн га, ареал распространения таких сельхозугодий в Западной Сибири достигал 7 млн га. Значительные площади в Западной Сибири занимали кислые почвы – 2,7 млн га. Наиболее эффективным с экономической точки зрения видом мелиорации в Западно-Сибирском регионе признавали орошение.

Первое специализированное, методологически обоснованное научное сопровождение проекта мелиорации земель было разработано в 1973 г. для технико-экономического доклада по мелиоративным мероприятиям в Новосибирской области. Научными сотрудниками лаборатории мелиорации почв ИПА СО АН СССР и почвоведом ФГУП «Запсибгипроводхоз» (Х.Х. Мелеск, М.С. Фоминых, М.Т. Устинов, Н.Г. Тимофеева, под руководством и при непосредственном участии заведующего лабораторией мелиорации почв ИПА д.б.н. П.С. Панина) были составлены почвенно-мелиоративная карта и карта мелиоративных мероприятий (1:500 000). Основой для указанных карт послужила Почвенная карта Новосибирской области, изданная в 1963 г. в масштабе 1:400000 под редакцией д.с.-х.н. Р.В. Ковалева. Были разработаны комплексы мероприятий, вычислены площади земель, подлежащих мелиорации, и дано распределение мелиоративных категорий земель по области, объединены

почвы однотипных ландшафтов, близких между собой по сельскохозяйственному достоинству и характеру необходимой мелиорации (Панин, Мелеск, 1978). Авторами охарактеризованы укрупнённые качественные единицы почвенного покрова, которые обозначили индексами: П – зональные автоморфные пахотнопригодные почвы; С – почвы солонцеватых комплексов; К – комплексы луговых, в разной степени засоленных и солонцеватых почв; Б – комплекс постоянно переувлажненных и заболоченных оторфованных почв и торфяников; Л – комплекс луговых, лугово-болотных и аллювиальных почв. Категории Л, Б, С и К составили основной мелиоративный фонд земель Новосибирской области (рис. 3).



Рисунок 3. Условные обозначения почвенно-мелиоративных комплексов на карте, 1973 г.

В соответствии с крупными качественными единицами почвенного покрова на основе сложных ландшафтов, выраженных в категории, были рекомендованы схематичные мелиоративные мероприятия:

- 1 – сеть сбросных коллекторов по заболоченной равнине;
- 2 – регулируемое осушение;
- 3 – сброс временно избыточных поверхностных вод;
- 4 – комплекс мелиоративных мероприятий в речных долинах;
- 5 – земледелие без мелиорации почв;
- 6 – орошение пахотнопригодных земель;
- 7 – комплекс мелиоративных мероприятий в условиях гривноложбинного рельефа;
- 8 – регулируемое осушение засоленных переувлажненных земель;
- 9–12 – мелиорация солонцов;
- 13 – залужение увлажненных засоленных земель солеустойчивыми видами трав;
- 14 – территории, на которых мелиоративные мероприятия проводить экономически нецелесообразно.

Впервые была проведена научно обоснованная оценка почвенного покрова с учетом его мелиоративных особенностей для проекта-схемы мелиорации земель и водохозяйственного обустройства территории Новосибирской области на ближайшую и отдаленную перспективу (до 2000 г.). Выявленные мелиоративные особенности ландшафтов и их почвенного покрова в Новосибирской области стали основой для дальнейшей разработки методологических подходов в сфере научного сопровождения проектов мелиорации земель.

В 1979 – начале 1980 года для разработки основных положений «Технико-экономического обоснования (ТЭО) переброски части стока сибирских рек в бассейн Аральского моря» была проведена мелиоративная оценка природных условий, в том числе почвенного покрова Новосибирской и Кемеровской областей, составлены карта мелиоративных группировок (М 1: 500 000) и карта мелиоративных категорий.

В основу работы положены методические рекомендации Почвенного института им. В.В. Докучаева, а именно «Легенда карты почвенно-мелиоративных группировок земель среднего региона в масштабе 1:1000000», разработанная для схематической оценки территории на нуждаемость в сельскохозяйственной мелиорации. Проект выполнен специалистами «Запсибгипроводхоз» совместно с сотрудниками ИПА СО АН СССР с учетом региональных особенностей почвенного покрова. В перечень наиболее значимых лимитирующих факторов, определяющих мелиоративные свойства почв, были включены дренированность, рельеф, засоление, солонцеватость, токсическая щелочность почв, переувлажнение, низкая водопроницаемость подстилающих пород. Комплексная оценка почв проведена с учетом гидрогеологических, инженерно-геологических, геоботанических, геоморфологических и других природных условий, что послужило новым этапом детализации мелиоративных особенностей почвенного покрова Западной Сибири.

На специальном Всесоюзном координационном совещании, проведенном 21–23 апреля 1981 г. в г. Пущино (Московская область) научным советом по проблемам почвоведения и мелиорации почв, была дана оценка изменения почвенно-мелиоративного состояния территорий в зоне влияния перераспределения стока. В работе совещания приняли участие 80 человек – представители 23 организаций, в том числе ИПА СО АН СССР (П.С. Панин, В.П. Панфилов, И.Н. Угланов), «Запсибгипроводхоз» (М.Т. Устинов) и др. Были представлены доклады организаций-исполнителей и доклад представителя научного совета по проблемам почвоведения и мелиорации почв, члена-корреспондента АН СССР В.А. Ковды.

По результатам обсуждений вынесено постановление: «Просить ... ИПА СО АН СССР совместно с соответствующими подразделениями Минводхоза СССР разработать программы проведения комплексных исследований на опытно-производственных участках. Считать обязательными элементами этой программы составление крупномасштабных гидрогеологических (М 1:50 000) и почвенно-мелиоративных (М 1:5000–1:10000) карт. Рекомендовать организациям-исполнителям при изучении мелиоративного состояния территорий руководствоваться «Перечнем мелиоративных признаков почв для целей орошения и борьбы с засолением» и «Перечнем мелиоративных признаков свойств и процессов мерзлотных и длительно-сезонно-мерзлотных почв для целей осушения, орошения и освоения». По результатам проведенных изысканий проект не получил поддержки и постановлением Политбюро ЦК КПСС 1986 г. решено прекратить дальнейшие работы.

Вслед за «Проектом технико-экономического обоснования переброски части стока сибирских рек в бассейн Аральского моря, 1979», последовал не менее грандиозный проект – «Схема развития мелиорации и водного хозяйства СССР на период до 2000 г.», требующий усовершенствования методических подходов к изучению мелиоративного фонда земель, и в том числе детализации почвенно-мелиоративных исследований. С учетом этого, для выделения почвенно-мелиоративной группировки земель как в целом для СССР, так и для Новосибирской области в частности, предложена расчетная модель (Методические указания..., 1982). Разработанная модель предусматривала проведение почвенно-мелиоративной оценки по 5-балльной шкале отдельно по каждому свойству почвы, требующему улучшения. Сумма частных почвенно-мелиоративных оценок выявляла почвенно-мелиоративную группу, отражая суммарную оценку «трудоемкости» мелиоративного улучшения почв, независимо от того, какими конкретными свойствами она вызывается и обозначается общим почвенно-мелиоративным индексом.

В 1983 г. в тесном содружестве почвоведов «Запсибгипроводхоз» с сотрудниками ИПА СО АН СССР было разработано «Природно-мелиоративное районирование Новосибирской области с почвенно-мелиоративным обоснованием», которое было во многом схематично и в дальнейшем потребовало доработки (Гаджиев, Устинов, 2001).

На основе данных материалов 1982–1983 гг. Октябрьский Пленум ЦК КПСС (1984) включил проект «Увеличение водности реки Карасук и озера Чаны» в перечень первоочередных объектов мелиорации на XII пятилетку. Этому решению способствовали обширные натурные исследования региональных природно-мелиоративных условий, в том числе структуры почвенного покрова и, в частности, детального изучения местных черноземов. В развитие этого решения 11 февраля 1986 г. было принято Постановление Совета Министров СССР № 207 «О мерах по строительству объектов для подачи воды из реки Обь в реку Карасук и озеро Чаны», которым предусматривалось в 1987 г. закончить разработку проекта первой очереди строительства и начать его реализацию. Это был один из самых спорных, но и наиболее тщательно проработанных мелиоративных проектов.

Южные районы Новосибирской области, тяготеющие к бассейну реки Карасук, характеризуются более интенсивным использованием сельскохозяйственных угодий, чем в целом по области. Так, удельный вес пашни в составе сельхозугодий в среднем по области составляет 32%, а по южным районам доходит до 48%. Вероятность засух в этих районах превышает 70%. Стабилизация и дальнейшая интенсификация агропромышленного комплекса – основной отрасли народного хозяйства этой зоны – может быть произведена только в условиях достаточного увлажнения, которое может быть обеспечено только при условии использования оросительных мелиораций. Отсутствие в достаточном количестве местных источников поверхностных и подземных вод для развития орошения вызывает необходимость привлечения вод реки Обь. В соответствии с проектом «Увеличение водности реки Карасук...» на базе обской воды в бассейне реки Карасук и вдоль тракта водоподачи предлагалось оросить 63 тыс. га сельскохозяйственных угодий (1 очередь) (Проект ..., 1988), из них 70–80% – черноземы (зона чернозёмных почв юго-восточной части Обь-Иртышского междуречья (рис. 4).

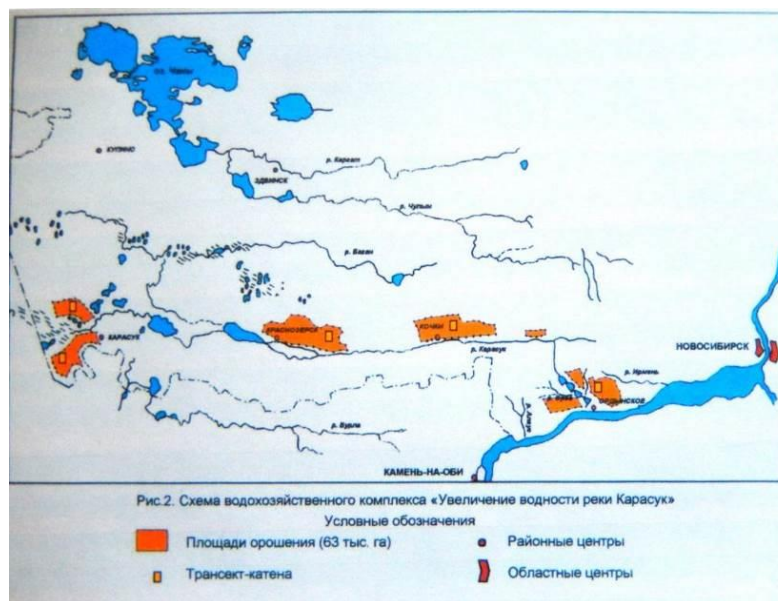


Рисунок 4. Схема водохозяйственного комплекса «Увеличение водности реки Карасук».

В процессе обсуждения проекта «Обосновывающие материалы увеличения водности реки Карасук» в научном сообществе развернулась оживленная дискуссия о негативном влиянии орошения на черноземы. Поэтому для обсуждения центрального звена в проекте – вопроса возможности и целесообразности орошения черноземов Западной Сибири – 17 марта 1983 г. было проведено специальное совещание Президиума СО АН СССР под председательством академика В.А. Коптюга, на заседании которого с докладом выступил директор ИПА СО АН СССР профессор Р.В. Ковалев. По результатам заседания Министру мелиорации и водного хозяйства СССР Н.Ф. Васильеву были направлены предложения по использованию западносибирских черноземов как объекта орошения, заверенные председателем СО АН СССР академиком В.А. Коптюгом и председателем СО ВАСХНИЛ академиком П.Л. Гончаровым (рис. 5), в которых было дано детальное обоснование их орошения. В этих предложениях были учтены масштабы проектирования строительства и ввода в эксплуатацию оросительных систем на территории Западно-Сибирской равнины; было предложено уделить особое внимание разработке новых и усовершенствованию известных способов рационального использования и охраны черноземов на фоне орошения. Было отмечено, что широкое применение оросительных мелиораций черноземов в европейской части Советского Союза привело к резкому ухудшению их свойств и снижению плодородия. Поэтому следует особое внимание уделять негативным процессам, возникающим в результате орошения черноземов Западной Сибири, отличающихся от европейских аналогов значительно худшими агромелиоративными качествами. Необходимо четко разграничивать внутризональные особенности современного агромелиоративного состояния сибирских черноземов, оценить характер возможных изменений их свойств при широком вовлечении в орошаемое земледелие. Неоднородность почвенно-мелиоративных условий черноземной зоны Сибири диктует

необходимость дифференцированного подхода к использованию черноземов как объекта орошения. На севере Кулундинской и Прииртышской равнинах для организации интенсивного кормопроизводства целесообразно регулярное, строго нормированное орошение отдельных массивов черноземов, имеющих легких механический состав и достаточную естественную дренированность. На Приобском плато целесообразно регулярное орошение отдельных дренированных массивов черноземов для выращивания кормовых и овощных культур. В целях борьбы с ирригационной эрозией необходимо строгое соблюдение поливных норм и режимов орошения. Среди прочего предлагалось продолжить глубокие экспериментальные и теоретические исследования черноземов Западной Сибири на фоне орошения и создать для этого 1–2 опытно-экспериментальных стационара в каждой из указанных зон, а также 2–3 экспериментальные оросительные системы.

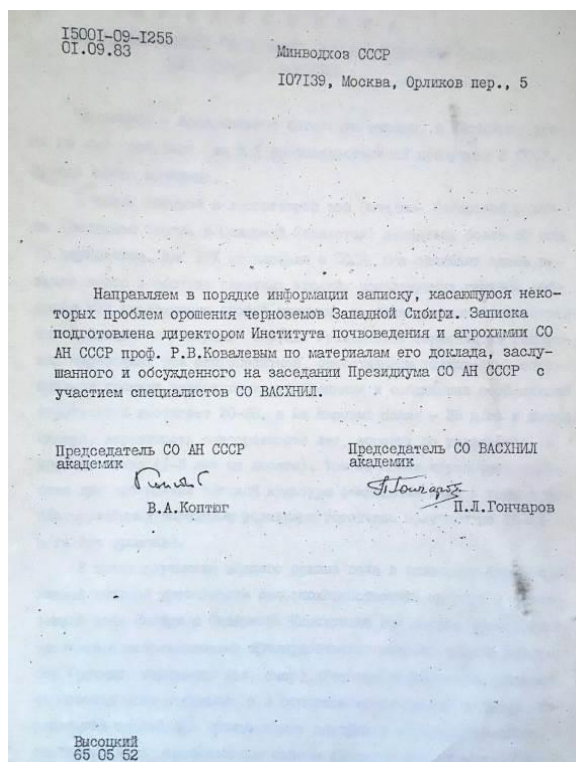


Рисунок 5. Записка «Предложения по использованию черноземов Западно-Сибирской равнины как объектов орошения»

Чтобы разрешить противоречия и выработать стратегию по совершенствованию научных основ земледелия с учетом зональных свойств и режимов почв, в г. Одессе 8–13 сентября 1983 г. было проведено Всесоюзное совещание «Плодородие черноземов в связи с интенсификацией их использования». От ИПА СО АН СССР участвовали В.П. Панфилов, Г.Ф. Копосов, Т.Ф. Зайцева, А.М. Шкаруба, от «Запсибгипроводхоз» М.Т. Устинов. основополагающие решения данного совещания: на южных черноземах Украины, Поволжья, Казахстана и Западной Сибири, где недостаток продуктивной влаги наиболее высокий и имеются природные запасы воды хорошего качества, систематическое орошение остается одним из основных средств, обеспечивающих компенсацию дефицита почвенной влаги и получения стабильных урожаев, особенно кормовых культур. Вызывает тревогу использование для полива черноземов щелочных и нейтральных слабоминерализованных вод (1–3 г/л с повышенным содержанием сульфатов и хлоридов натрия). Под влиянием этих вод химические и физические свойства почв изменялись в сторону осолонцевания, ощелачивания, дезинтеграции структуры, потери обменного кальция и запасов гумуса и формированию признаков осолоделого солонца».

Несмотря на обширную отечественную и зарубежную литературу по оценке качества поливной воды и влиянию вод различного состава на плодородие почв и продуктивность растений, не было выработано единое мнение по этим вопросам и единый принцип оценки качества поливной воды. Это объясняется прежде всего отсутствием комплексной почвенно-

мелиоративной оценки пригодности воды для орошения. Возможность применения оросительных мелиораций необходимо рассматривать по комплексу следующих показателей: химическому составу оросительных вод, солеустойчивости сельскохозяйственных культур, свойствам и режимам почв, мелиоративному состоянию орошаемых земель, а также имеющейся техники и используемой технологии орошения.

Почвенному институту им. В.В. Докучаева (головная организация) и Институту почвоведения и агрохимии СО АН СССР было поручено в срок до 1 января 1987 г. «завершить разработку комплексной программы исследований по рациональному использованию орошаемых и неорошаемых черноземов, повышению их плодородия в условиях интенсивного использования».

Для обоснования и успешной реализации перспективных планов и проектов орошения, широкого внедрения ирригации в специфичном по природно-климатическим условиям регионе Западной Сибири, Институтом почвоведения и агрохимии СО АН СССР при участии специалистов «Запсибгипрводхоз» были проведены исследования региональных особенностей генетических и мелиоративных свойств сибирских черноземов и характера их изменения при орошении, на основании которых издана монография «Черноземы: свойства и особенности орошения» (1988). В монографии обобщены новые материалы глубокопрофильного изучения свойств, режимов и плодородия сибирских черноземов при орошении, способствующие решению проблем их ирригационного освоения, рационального использования и охраны.

Из-за широкого распространения в Западно-Сибирском регионе солонцов и солонцовых почв (6948 тыс. га), а также их залегания пятнами в массивах зональных плодородных земель встала проблема рационального использования солонцовых комплексов в сельскохозяйственном производстве. Обладающие неблагоприятными физическими и химическими свойствами, но при этом высоким потенциальным плодородием, солонцы стали объектом обсуждений на специальном Всесоюзном научно-техническом совещании «Пути повышения продуктивности солонцовых земель» в г. Новосибирске (ВАСХНИЛ) 30.06-04.07 1986 г. На совещании были предложены пути повышения эффективности мелиоративного освоения солонцовых территорий (Д.С. Булгаков), оценено современное состояние проблем классификации, географии и картографирования солонцовых почв (Э.А. Корнблум), периодичность развития солонцов (П.С. Панин), особенности мелиорации и освоения солонцов в условиях орошения. Для участников совещания провели экскурсию в совхоз «Кабинетный» Чулымского района Новосибирской области для ознакомления с опытом мелиорации корковых солонцов различными дозами гипса (рис. 6). Следует сказать, что на этом опытном участке наблюдения за уровнем и химическим составом грунтовых вод и их влиянием на свойства почв ведутся исследователями СФНЦА РАН и ИПА СО РАН на протяжении уже более 30 лет (Елизаров и др., 2020).



Рисунок 6. П.С. Панин (в центре) и участники Всесоюзного научно-технического совещания на экскурсии в совхозе «Кабинетный», Новосибирская область, 1986 г.

В соответствии с заданием комитета по земельным ресурсам Новосибирской области в 1994 г. была составлена эколого-мелиоративная карта левобережной части Новосибирской области масштаба 1:500 000. Авторы карты: В.А. Казанцев, Л.А. Магаева, Т.Н. Елизарова (ИПА СО РАН), М.Т. Устинов («Запсибгипроводхоз»), под общей редакцией В.Н. Михайличенко (ИПА СО РАН); также в составление карты принимали участие Г.П. Тарасов, В.Н. Васькина (Новосибирская геолого-поисковая экспедиция) и А.И. Кожевников (СибНИИЗХиМ).

Основой для составления карты послужил большой фактический материал, полученный при производстве целевых почвенных, геологических, гидрогеологических и других съемок крупного и среднего масштаба. При эколого-мелиоративной оценке почвенного покрова территории, а также ландшафтной почвенной характеристике, был применен геосистемный подход (Казанцев и др., 2001). Т.Н. Елизаровой с соавторами в монографии «Эколого-мелиоративный потенциал почвенного покрова Западной Сибири» (1999) предложены критерии его оценки. Эколого-мелиоративный потенциал должен отражать интегральную характеристику объектов, не только пространственную совокупность природных систем, но и вертикальную стратификацию компонентов на глубину, соответствующую их рангу. Для этого целесообразно рассматривать систему почвы – породы зоны аэрации – грунтовые и артезианские воды, учитывая особенности климата и растительности. Такой системный подход позволил развить совершенно новое направление природопользования – экологическую мелиорацию, учитывающую экологическую оценку современного состояния природных систем и определяющую оптимальный вариант мелиорации исследуемых почв. В 2000 г. для Атласа Новосибирской области (второе издание, 2002) специалистами ИПА СО РАН В.А. Казанцевым, Т.Н. Елизаровой, Л.А. Магаевой и М.Т. Устиновым с использованием комплексного ландшафтного подхода была составлена карта «Мелиорации почв» масштаба 1:400000, где выделены 22 района по основным мелиоративным мероприятиям, рекомендуемым для рационального землепользования.

По инициативе Минсельхоза СССР и Россельхозакадемии в 1995 г. в г. Новосибирске была проведена научно-практическая конференция, посвященная 100-летию начала государственных работ по обводнению и осушению земель Барабинской низменности под руководством одного из основоположников российской мелиорации – И.И. Жилинского. Участниками конференции подведены итоги столетнего опыта мелиоративных работ в Западной Сибири и отмечена их высокая эффективность. От ИПА СО РАН участвовали: В.К. Бахнов, Т.Н. Елизарова, В.А. Казанцев, А.И. Сысо, А.А. Сеньков, Л.А. Магаева, М.Т. Устинов (рис. 7).



Рисунок 7. Участники научно-практической конференции, посвящённой 100-летию создания экспедиции И.И. Жилинского по обводнению и осушению земель Западной Сибири. Убинская ОМС, 1995 г.

В последнее время региональные научно-практические форумы по комплексу проблем и их решению в сфере мелиорации земель, связанных с рациональным использованием и охраной природных ресурсов в Новосибирской области, проводятся достаточно регулярно (рис. 8). Основная цель форумов – возрождение, сохранение и развитие мелиоративного дела в Сибири. Материалы форумов и их резолюции опубликованы в журнале «Мелиорация и водное хозяйство».



Рисунок 8. Участники Барабо-Кулундинского форума, р. п. Чаны, Новосибирская область, 2015 г.

Примером научного сопровождения проектов мелиорации стала монография «Эколого-экономическая эффективность комплексных мелиораций Барабинской низменности» (2009). В данной монографии авторами в свете решения научно-практической конференции от 5–8 июля 2005 г., посвященной 110-летию мелиоративных работ в Барабинской низменности, выполнен анализ современного природно-мелиоративного состояния земель и социально-хозяйственных условий Барабинской низменности; с учетом нового подхода обоснованы мелиоративные мероприятия, позволяющие повысить эколого-экономический потенциал региона. Применение новых научных направлений, базирующихся на использовании энергетических подходов к оценке мелиоративной деятельности в сочетании с принципами адаптивно-ландшафтного земледелия, позволило разработать технологию формирования продуктивного и экологически устойчивого агроландшафта, которая включает:

- оценку энергетического состояния природного объекта;
- расчет продуктивного потенциала и экологически допустимой величины урожайности сельскохозяйственных культур для конкретных природных условий;
- обоснование видов и объемов мелиорации на основе энергетических и экологических критериев;
- оптимизацию соотношения элементов агроландшафта с использованием ГИС-технологий;
- проектирование природных мероприятий, обеспечивающих компенсацию антропогенной деятельности;
- эколого-экономическое обоснование предложенного комплекса мелиоративных мероприятий.

Расчеты, базирующиеся на анализе обширного фактического материала ФГУП «Запсибгипроводхоз», данных Департамента АПК Новосибирской области, материалов научных публикаций по Барабинской низменности, научных исследований ученых ВНИИГиМ, а также комплексной экспедиции ВНИИГиМ – ФГУП «Запсибгипроводхоз» показали:

– современное состояние сельскохозяйственных угодий Барабинской низменности трудно назвать удовлетворительным. Продуктивность сельскохозяйственных угодий низкая, составляющая 0,4–0,7 тыс. к. ед./га на основных почвах и 0,9 тыс. к. ед./га на чернозёмах выщелоченных и обыкновенных. Почвы бедны питательными элементами, деградируют, воспроизводство почвенного плодородия не происходит, экологическая и энергетическая устойчивость крайне низкая;

– проведение только гидротехнических мелиораций позволит увеличить продуктивность сельскохозяйственных угодий до 1,1–4,3 тыс. к. ед./га, но при этом не будут соблюдаться экологические требования: коэффициент устойчивости агроландшафта не превысит 0,5, баланс гумуса будет отрицательным;

– реализация агротехнических и культурно-технических мероприятий в комплексе с химической и агробиомелиорацией не позволит достичь экологически обоснованной величины продуктивности, но обеспечит положительный баланс гумуса за счет агротехнических мероприятий, при этом устойчивость территории (Барабинской низменности) останется низкой ($K_y = 0,1–0,35$);

– при проведении комплекса мелиоративных и агротехнических мероприятий возможно увеличение продукционного потенциала обрабатываемых угодий до экологически обоснованной величины, равной 3,0–4,8 тыс. к. ед./га, при поддержании коэффициента устойчивости на уровне 0,84–0,98 и положительном балансе гумуса.

Рекомендуемый адекватный комплекс первоочередных мелиоративных и агротехнических мероприятий должен включать: реконструкцию осушительных систем, реконструкцию систем лиманного орошения и строительство новых оросительных систем с проведением агро-мелиоративных мероприятий и культурно-технических работ.

Реализация проекта по развитию комплексных мелиорационных мероприятий на территории Барабинской низменности является экономически обоснованной: срок окупаемости проекта находится в пределах 5 лет.

Следует подчеркнуть, что Постановлением Правительства РФ от 30 марта 2017 г. №396 «О внесении изменений в Государственную программу развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельхозпродукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» установлены следующие задачи:

– повышение продуктивности потенциала мелиорируемых земель и эффективное использование природных ресурсов;

– повышение плодородия почв средствами комплексной мелиорации в условиях изменения климата.

В этой связи несомненно актуальным является широко обсуждаемый вопрос о создании Сибирского филиала Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации в г. Новосибирске для научного обеспечения мелиорации земель в Сибирском Федеральном округе.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атлас Новосибирской области*. ФГУП «Новосибирская картографическая фабрика». Роскартография, 2002.
2. *Гаджиев И.М., Устинов М.Т.* Почвенно-мелиоративная группировка минеральных земель юга Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2001. Том 8. № 3. С. 293–298.
3. *Елизарова Т.Н., Казанцев В.А., Магаева Л.А., Устинов М.Т.* *Эколого-мелиоративный потенциал почвенного покрова Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 240 с.
4. *Елизаров Н.В., Попов В.В., Семендяева Н.В.* Современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири // *Почвоведение*. 2020. № 12. С. 1451–1459. DOI: [10.31857/S0032180X20120059](https://doi.org/10.31857/S0032180X20120059)
5. *Казанцев В.А., Магаева Л.А., Елизарова Т.Н., Устинов М.Т.* Эколого-мелиоративная оценка почвенного покрова южной лесостепи Барабинской равнины // *Сибирский экологический журнал*. 2001. Том 8. № 3. С. 275–280.

6. Кирейчева Л.В., Белова И.В., Глистин М.В., Устинов М.Е., Юрченко И.Ф. *Эколого-экономическая эффективность комплексных мелиораций Барабинской низменности*. М.: ВНИИЛ. 2009. 312 с.
7. Маслов Б.С. Комплексная мелиорация Барабинской низменности и ее научное сопровождение // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2005. № 6. С.11–16.
8. Маслов Б.С. Первый опыт мелиорации болот в Барабинской низменности // *Сельские новости*. 2005. № 4. С. 9–11.
9. *Методические указания по определению мелиоративного фонда*. Почвенно-мелиоративное обоснование. М.: Союзгипропроводхоз, 1982.
10. Панин П.С., Мелеск Х.Х. *Почвенный покров и районирование мелиоративных мероприятий* // Новосибирская область. Природа и ресурсы. Новосибирск: Наука Сибирское отделение, 1978. 125–147 с.
11. *Проект «Увеличение водности р. Карасук (1 очередь)*. Новосибирская область». Конспект «Запсибгипропроводхоз», г. Новосибирск, 1988.
12. *Черноземы: свойства и особенности орошения*. Новосибирск: Наука Сибирское отделение, 1988. 256 с.

Поступила в редакцию 24.06.2021

Принята 30.06.2021

Опубликована 05.11.2021

Сведения об авторах:

Устинов Михаил Тимофеевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); ustinov@issa-siberia.ru

Гаврилов Денис Александрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); gavrilov@issa-siberia.ru

Елизаров Николай Владимирович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); elizarov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

HISTORICAL ASPECTS OF LAND MELIORATION DEVELOPMENT IN WEST SIBERIA

© 2021 M.T. Ustinov, [D.A. Gavrilov](#)^{ID}, N.V. Elizarov^{ID}

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: ustinov@issa-siberia.ru

The article presents a historical review of scientific and practical materials about the development of soil melioration projects in West Siberia, emphasizing the need for their comprehensive research support. The article describes the methodology and means for studying and implementing land melioration projects developed by researchers in various fields, representing combined efforts of Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute and A.N. Kostyakov Russian Research Institute of Hydrological Engineering and Melioration.

Key words: land melioration; chernozems; irrigation; West Siberia; soil reclamation map; transfer of Siberian rivers; research methodology for melioration

How to cite: Ustinov M.T., Gavrilov D.A., Elizarov N.V. Historical aspects of land melioration development in West Siberia // *The Journal of Soils and Environment*. 2021. 4(2). e143. doi: [10.31251/pos.v4i2.143](https://doi.org/10.31251/pos.v4i2.143) (in Russian with English abstract)

REFERENCES

1. *Atlas of the Novosibirsk region*. Novosibirsk Cartographic Factory. Roskartografiya, 2002. (in Russian)
2. *Gadzhiev I.M., Ustinov M.T.* Soil-reclamation grouping of mineral lands in the south of Western Siberia, *Siberian ecological journal*, 2001, V. 8, No. 3, p. 293–298. (in Russian)

3. Elizarova T.N., Kazantsev V.A., Magaeva L.A., Ustinov M.T. *Ecological and reclamation potential of the soil cover in Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ. SB RAS, 1999. 240 p. (in Russian)
4. Elizarov N.V., Popov V.V., Semendyaeva N.V. Modern hydromorphism of solonchets in the forest-steppe zone of Western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2020, V. 53, No. 12, p. 1701–1708. DOI: [10.1134/S1064229320120054](https://doi.org/10.1134/S1064229320120054)
5. Kazantsev V.A., Magaeva L.A., Elizarova T.N., Ustinov M.T. Ecological and reclamation assessment of the soil cover of the southern forest-steppe of the Barabinsk plain, *Siberian ecological journal*, 2001, V. 8, No. 3, p. 275–280. (in Russian)
6. Kireicheva L.V., Belova I.V., Glistin M.V., Ustinov M.E., Yurchenko I.F. *Ecological and economic efficiency of complex reclamation of the Baraba lowland*. M.: VNIIIL, 2009. 312 p. (in Russian)
7. Maslov B.S. Complex reclamation of the Baraba lowland and its scientific support, *Melioration and water economy*, 2005, No. 6, p. 11–16. (in Russian)
8. Maslov B.S. The first experience in reclamation of bogs in the Barabinsk lowland, *Sel'skie novosti*, 2005, No. 4, p. 9–11. (in Russian)
9. *Methodical instructions for determining the reclamation fund*. Soil-reclamation substantiation. M.: Soyuzgiprovodkhoz, 1982. (in Russian)
10. Panin P. S., Melesk H. Kh. *Soil cover and zoning of reclamation measures. Novosibirsk region*. Nature and resources. Novosibirsk: Nauka Publ. SB RAS, 1978. 125–147 p. (in Russian)
11. *The project "Increasing the water content of the r. Karasuk (1st stage). Novosibirsk region"*. Synopsis "Zapsibgiprovodkhoz", Novosibirsk, 1988. (in Russian)
12. *Chernozems: properties and features of irrigation*. Novosibirsk: Nauka Publ. SB RAS, 1988. 256 p. (in Russian)

Received 24 June 2021

Accepted 30.06.2021

Published 05.11.2021

About the authors:

Ustinov Mikhail T. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); ustinov@issa-siberia.ru

Gavrilov Denis A. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gavrilov@issa-siberia.ru

Elizarov Nikolay V. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geography and Soil Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); elizarov@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)